



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ELEKTRONICKÝ RLC MĚŘIČ

ELECTRONIC RLC METER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Radim Dvořák

ID: 186800

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Elektronický RLC měřič

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vyrobte autonomní elektronický měřič pasivních součástek. Zařízení bude napájené z akumulátoru a výsledky bude zobrazovat na displeji. Uživatel si bude moci vybrat ze dvou režimů. V prvním bude vždy nejprve typ připojené součástky automaticky detekován a poté bude součástka změřena. Druhý režim pak bude určen pro rychlé měření, kdy typ součástky bude předem vybrán. Pro realizaci použijte mikrokontrolér ATME1.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Elektrotechnická měření. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.

[2] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. Mikroprocesorová technika: [práce s mikrokontroléry řady ATME1 AVR ATXmega A4]. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-406-4.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá rozbořem metod měření pasivních součástek R, L, C užívaných v elektronických obvodech. Práce obsahuje postup výběr metod následný návrh elektronického autonomního RLC měřiče za použití čipů ATMEL, napájeného z akumulátoru, který je schopen měřit primární vlastnosti těchto prvků.

Klíčová slova

Odpor, Rezistor, Kapacita, Kondenzátor, Kapacitor, Indukce, Induktor, Cívka, RLC, měřič

Abstract

This work deals with measurement methods of passive components R, L ,C used almost in every electrical circuit. Work describes progress of choosing the right methods for measurement and also the process of designing the autonomous RLC meter with use of ATMEL microprocessor chips. The RLC meter will be powered from rechargable battery and will be able to measure primary attributes of RLC components.

Keywords

Resistance, Resistor, Capacitance, Condensator , Capacitor, Induction, Inductor, Coil, RLC, meter

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivo Lattenbergovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **8. června 2020**

.....
podpis autora

Bibliografická citace:

DVOŘÁK, Radim. *Elektronický RLC měřič* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-08].
Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122842>. Bakalářská práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ivo Lattenberg.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Radim Dvořák
VUT ID studenta:	186800
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2019/20
Téma závěrečné práce:	Elektronický RLC měřič

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **8. června 2020**

.....
Podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
1 Úvod	1
2 Teoretický úvod	2
2.1 Vymezení základních pojmů a zákonů	2
2.1.1 Ohmův zákon	2
2.1.2 Kirchhoffovy zákony	3
2.1.2.1 První Kirchhoffův zákon	3
2.1.2.2 Druhý Kirchhoffův zákon	3
2.2 Základní pasivní prvky obvodů	4
2.2.1 Rezistory	4
2.2.2 Kondenzátory	4
2.2.3 Cívky	5
2.3 Měřicí metody	6
2.3.1 Měření odporů	6
2.3.1.1 Jednoduchý dělič napětí	6
2.3.1.2 Pomocí proudového zdroje	7
2.3.2 Měření kondenzátorů	8
2.3.2.1 Nabíjení kondenzátoru přes známý odpor R	8
2.3.2.2 Využití externího obvodu NE555	9
2.3.3 Měření cívek	10
2.3.3.1 Paralelní rezonanční obvod	10
2.3.3.2 Měření sinusovým signálem	11
2.4 Integrované obvody	11
2.4.1 Mikrokontroléry	11
2.4.1.1 Jak funguje mikrokontrolér	12

2.4.1.2	ATMEL AVR.....	12
2.4.1.3	Registry mikrokontroléru	13
2.4.1.4	Přerušení.....	14
2.4.2	NE555	14
3	Postup návrhu RLC měřiče	16
3.1	Zdrojová část	16
3.1.1	Princip Step-Up měniče	16
3.1.2	Realizace zdroje	17
3.1.2.1	Zdroj +5 V.....	17
3.1.2.2	Zdroj -5 V.....	19
3.1.2.3	Zdroj +12 V	20
3.1.2.4	Konečný návrh zdroje	20
3.2	A/D převodník	22
3.3	Zpřesnění měření napět'ovou referencí.....	24
3.4	Měření odporů	25
3.4.1	Přepínání rozsahů měření odporů.....	26
3.5	Měření kondenzátorů	27
3.5.1	Měření kondenzátorů v zapojení s obvodem NE555	27
3.5.2	Měření kondenzátoru nabíjením přes odpor R.....	27
3.6	Měření cívek.....	28
3.6.1	Využití přechodového jevu na cívce a převod na frekvenci	29
3.6.2	Měření rezonanční frekvence paralelního obvodu LC	30
3.6.2.1	Měření amplitudy signálu na paralelním obvodu LC	31
3.6.2.2	Detekce fáze signálu na paralelním obvodu LC.....	31
3.6.3	Měření impedance cívky při sinusovém signálu	32
3.7	Generátor sinusového signálu.....	33
3.8	Spojení měřících obvodů	34

3.9	Přístrojový zesilovač.....	35
3.10	Výběr displeje	36
3.11	Výběr mikrokontroléru	38
3.11.1	ATMega328P-PU.....	39
3.12	Ovládací prvky	40
3.13	Výběr baterie.....	40
3.14	Zakončení návrhu.....	41
4	Softwarová část RLC měřiče.....	42
4.1	Základní práce s registry mikrokontroléru Atmel	42
4.1.1	Vnitřní převodník mikrokontroléru ATMEGA328P	42
4.1.2	Vnitřní časovače mikrokontroléru ATMEGA328P	43
4.1.3	Obsluha přerušení.....	45
4.2	Struktura programu RLC měřiče	45
4.3	Interakce zařízení s uživatelem.....	46
4.3.1	Tlačítko potvrzení	46
4.3.1.1	Rozhodnutí o dlouhém a krátkém stisku.....	47
4.3.2	Tlačítka navigace up a down.....	47
4.3.3	Grafické rozhraní měřiče.....	48
4.4	Autonomita	48
4.5	Algoritmus měření odporů.....	49
4.1	Algoritmus měření kondenzátorů	50
4.2	Algoritmus měření cívek	51
4.3	Nahrání programu do mikrokontroléru.....	52
5	Závěr.....	53
	Literatura	55
	Seznam symbolů a zkratk.....	57
	Seznam příloh.....	59

Příloha	60
---------------	----

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Ohmův zákon.....	2
Obr. 2-2 První Kirchhoffův zákon	3
Obr. 2-3 Druhý Kirchhoffův zákon.....	4
Obr. 2-4 Evropské značení rezistoru	4
Obr. 2-5 Evropské značení kondenzátoru	5
Obr. 2-6 Evropské značení cívky	5
Obr. 2-7 Příklad jednoduchého děliče napětí	7
Obr. 2-8 Příklad metody s proudovým zdrojem $R = 1 \Omega$	7
Obr. 2-9 Zapojení metody nabíjení kondenzátoru přes známý odpor R	9
Obr. 2-10 Klasické zapojení integrovaného obvodu NE555 v astabilním zapojení ..	10
Obr. 2-11 Jednoduchý rezonanční obvod.....	11
Obr. 2-12 Vnitřní zapojení integrovaného obvodu NE555	15
Obr. 3-1 Jednoduchý princip Step-Up měniče	17
Obr. 3-2 Zapojení zdrojové části RLC měřiče	21
Obr. 3-3 Návrh desky plošného spoje pro zdrojovou část	21
Obr. 3-4 Zapojení větve pro měření odporů a kondenzátorů	28
Obr. 3-5 Zapojení využití přechodového jevu	30
Obr. 3-6 Zapojení měření amplitudy signálu	31
Obr. 3-7 Zapojení detekce fáze na paralelním obvodu LC	32
Obr. 3-8 Průběhy napětí v sériovém obvodu RL	33
Obr. 3-9 Schéma propojení měřících obvodů	35
Obr. 3-10 Schéma zapojení zesilovače	36
Obr. 4-1 Jednoduchý diagram algoritmu zjišťování měřené součástky.....	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hodnoty odporů	25
Tabulka 2 – Rozložení pinové konfigurace mikrokontroléru ATMEGA328P	39

1 ÚVOD

Měřicí zařízení pro měření primárních vlastností pasivních součástek jsou nedílnou součástí laboratoří zabývajících se vývojem elektronických zařízení. Tyto přesné kalibrované přístroje však bývají často velmi drahé a neskladné. Navíc v mnoha aplikacích není potřebné znát přesnou hodnotu součástky pro zařazení do projektu, ale někdy stačí hodnota přibližná pro aplikace pull-up rezistorů nebo blokovacích kondenzátorů.

Cílem této práce je prozkoumat problematiku měření odporů, kondenzátorů a cívek. Pomocí těchto znalostí navrhnout hardwarovou část jednoduchého jednosvorkového RLC měřiče za použití mikrokontroléru společnosti ATMEL. Tedy navrhnout schéma a desku plošných spojů. RLC měřič bude napájen z akumulátoru. Přístroj sestavit a sestrojený přístroj naprogramovat pro měření pasivních součástek R, L a C. Cílem práce není sestavení laboratorního zařízení ale spíše sestavení „kapesní“ verze zařízení pro rychlou identifikaci součástky schopné připojenou součástku automaticky detekovat, rozpoznat a informovat uživatele o přibližné hodnotě primární vlastnosti součástky.

Práce je členěna do tří základních kapitol. Teoretického úvodu, který popisuje základní elektrické veličiny a zákony stejně jako různé měřicí metody pasivních prvků. Druhá část se věnuje návrhu měřiče. Obsahuje užité postupy a slepé uličky při vývoji zařízení. Popisuje použité součástky, výhody a nevýhody zvoleného návrhu. Poslední částí je část vývoje softwarové části, která popisuje vývoj zařízení z hlediska softwaru. Popisuje základní algoritmy a postupy využívané při konstrukci softwaru pro RLC měřič.

2 TEORETICKÝ ÚVOD

2.1 Vymezení základních pojmů a zákonů

Pro všechny prvky elektrických obvodů platí elektrické zákony popisující stavy a chování základních prvků a veličin na těchto prvcích.

Elektrický odpor popisuje schopnost elektricky vodivých materiálů vést elektrický proud. Výše elektrického odporu je závislá na materiálu vodiče, průřezu vodiče, délce vodiče a na teplotě. Elektrický odpor se značí R a jeho jednotkou je Ohm [Ω].

Elektrické napětí se definuje jako rozdíl elektrických potenciálů ve dvou bodech. Značí se U a jednotkou je Volt [V].

Elektrický proud určuje množství elektrického náboje procházející danou oblastí za jednotku času. Značí se I a jednotkou je Ampér [A].

2.1.1 Ohmův zákon

Ohmův zákon je nejzákladnější stavební prvek všech elektrických obvodů. Určuje vztahy mezi třemi základními elektrickými veličinami.

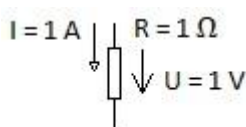
Znění Ohmova zákona: „Proud protékající vodičem mezi dvěma body je přímo úměrný elektrickému napětí mezi těmito body.“

$$I = \frac{U}{R} \quad [A](2.1),$$

kde:

- I elektrický proud [A]
- U elektrické napětí mezi dvěma body [V]
- R elektrický odpor vodiče [Ω]

Při napětí 1V na odporu o hodnotě 1 Ω , bude výsledný proud odporem 1A.



Obr. 2-1 Ohmův zákon

2.1.2 Kirchhoffovy zákony

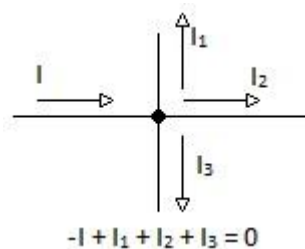
Kirchhoffovy zákony jsou pravidla popisující principy zachování náboje a energie v částech elektrického obvodu. S využitím těchto pravidel je možné analyzovat elektrické obvody a chování elektrických veličin na jednotlivých prvcích obvodů. [3]

2.1.2.1 První Kirchhoffův zákon

První Kirchhoffův zákon, také zákon o proudech či uzlech, popisuje zákon zachování elektrického náboje. Tedy „chování“ proudu v každém uzlu elektrického obvodu. Zákon říká: „*Součet proudů vstupujících do uzlu se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících.*“, tedy součet všech proudů v uzlu je roven 0. [3]

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad [A](2.2),$$

kde I_k je proud vstupující / vystupující z uzlu



Obr. 2-2 První Kirchhoffův zákon

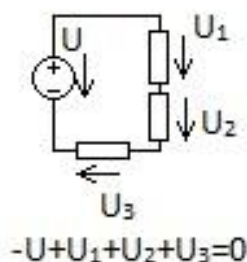
2.1.2.2 Druhý Kirchhoffův zákon

Druhý Kirchhoffův zákon, také zákon o napětí či smyčkách, popisuje zákon zachování energie. Popisuje distribuci potenciálu ve smyčce.

Znění zákona: „*Součet potenciálů (napětí) se v uzavřené části obvodu (smyčce) rovná nule.*“, tedy součet všech napětí ve smyčce je roven 0. [3]

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \quad [V](2.3),$$

kde U_k je napětí na prvku ve smyčce



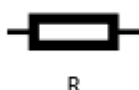
Obr. 2-3 Druhý Kirchhoffův zákon

2.2 Základní pasivní prvky obvodů

Základními prvky každého obvodu jsou součástky pasivní. Jsou to prvky, které nelze ovlivňovat vnějšími prvky (signálem). Mezi tyto prvky patří rezistory, kondenzátory a cívky. Měření vlastností těchto prvků jsou cílem této práce.

2.2.1 Rezistory

Rezistor je pasivní součástka obvodu, jehož primární vlastností je elektrický odpor R . Často bývá používán pro omezení elektrického proudu tekoucího mezi dvěma body nebo k zisku úbytku napětí na rezistoru. Úbytek napětí na rezistoru se dá spočítat dle Ohmova zákona (viz rovnice č. 1) jako proud tekoucí rezistorem vynásobený s hodnotou odporu. Rezistor se chová stejně při stejnosměrném (DC) i střídavém (AC) proudu.



Obr. 2-4 Evropské značení rezistoru

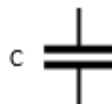
Rezistory mohou být tvořeny různými materiály a mohou také mít různorodý tvar a hodnotu. Existují rezistory pevné, s danou hodnotou odporu, a proměnlivé, s proměnlivou hodnotou odporu (trimry, potenciometry).

2.2.2 Kondenzátory

Kondenzátor je pasivní součástka obvodu, jehož primární vlastností je elektrická kapacita C , jejíž jednotkou je Farad [F]. Bývá používán pro uchování elektrické energie

v podobě elektrického náboje. V obvodových aplikacích bývá často využíván jako kompenzátor výkyvů napětí napájení při náhlém spínání přidruženého obvodu.

Důležitou vlastností kondenzátorů je jejich zdánlivý odpor (Impedance). Při DC signálu je zdánlivý odpor kondenzátoru roven nekonečnu, a tedy se rovná teoretickému rozpojení větve. Při AC signálu se zdánlivý odpor snižuje se vzrůstající frekvencí f .



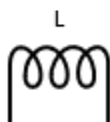
Obr. 2-5 Evropské značení kondenzátoru

Základním stavebním prvkem kondenzátoru jsou dvě vodivé desky, které jsou od sebe odděleny dielektrikem. Účinná plocha a vzdálenost desek určuje kapacitu. Základními typy kondenzátorů jsou kondenzátory keramické a elektrolytické.

2.2.3 Cívky

Cívka je pasivní součástka obvodu, jehož primární vlastností je indukčnost L . Jednotkou indukčnosti je Henry [H]. Cívka uchovává elektrickou energii v podobě magnetického pole. Používá se k indukování elektrického proudu proměnným magnetickým polem například v generátorech, step-up měničích a podobně.

Stejně jako u kondenzátorů i u cívek se projevuje závislost zdánlivého odporu na frekvenci f . Na rozdíl od kondenzátorů je však cívka při DC signálu rovna zkratu a se zvyšující se frekvencí AC signálu se zvyšuje i její zdánlivý odpor.



Obr. 2-6 Evropské značení cívky

Cívku tvoří navinutý vodič. Lze rozlišit dva druhy cívek. Solenoid – dlouhá cívka, a toroid – cívka stočená do kruhu.

2.3 Měřicí metody

Aby bylo možné předloženou součástku proměřit, je potřeba znát zákony z předchozí kapitoly nebo popřípadě některou z metod, která je využívá. Metod pro měření hodnot součástek je mnoho, proto zde uvedu ty metody a principy, které jsou nejzákladnější nebo které budeme využívat v našem měřiči. U měření reálných součástek je potřeba vzít v potaz parazitní vlastnosti. Na rozdíl od teorie ideálních součástek, každá reálná součástka má svůj odpor, kapacitu a indukčnost, i když jen třeba minimální.

2.3.1 Měření odporů

Při měření odporů je nutné vzít v potaz rozdělení odporů dle velikostí. Odporů se dělí na

- Malé odpory ($< 1 \Omega$)
- Střední odpory ($1 - 10^6 \Omega$)
- Velké odpory ($> 10^6 \Omega$)

Zařízení RLC v rozsahu této práce se nebude zabývat měřením malých odporů, ale odporů středních a velkých. Pro měření odporů středních a vyšších hodnot lze využít několik metod, z nichž některé jsou zmíněny v následujících kapitolách.

2.3.1.1 Jednoduchý dělič napětí

Je nejzákladnější metoda měření odporů. Při zapojení dvou odporů na známý zdroj napětí dojde k rozložení napětí v závislosti na poměru velikostí hodnot odporů. Při připojení neznámého odporu do R_2 obvodu ke známému odporu R_1 při známém napětí U , lze neznámý odpor spočítat z napětí na něm indukovaném dané rovnicí 2.4. [1]

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad [V] \quad (2.4)$$

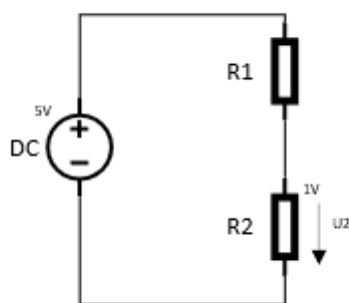
kde:

- U_2 napětí na námi hledaném odporu [V]
- U napětí zdroje [V]
- R_1 známý odpor [Ω]
- R_2 neznámý odpor [Ω],

Po změření napětí na odporu R_2 lze rovnici 2.4 upravit do formy vyjadřující závislost velikosti odporu R_2 na ostatních prvcích obvodu (2.5). Při dosazení hodnot do rovnice získáme reálnou velikost odporu R_2 .

$$R_2 = \frac{U_2 \cdot R_1}{U - U_2} \quad [\Omega](2.5)$$

Příklad: Při zdroji napětí 5 V, a známém odporu $R_1 = 1000 \, \Omega$, měřené napětí na neznámém odporu $U_2 = 1 \, \text{V}$. Dosazením do rovnice (2.5) zjistíme, že hledaný odpor se rovná $R_2 = 250 \, \Omega$.

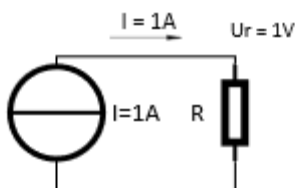


Obr. 2-7 Příklad jednoduchého děliče napětí

2.3.1.2 Pomocí proudového zdroje

Je metoda, při které definovaný neměnný proud z proudového zdroje prochází přes neznámý odpor v obvodu. Na odporu vzniká napětí proporcionální k procházejícímu proudu. Po změření napětí na odporu R , lze vypočítat neznámý odpor dle Ohmova zákona (2.1). [1]

Příklad: Při proudovém zdroji o hodnotě 1 A je změřeno napětí na neznámém odporu 1 V, pomocí úpravy vzorce (2.1) a následnému dosazení lze vypočítat hledaný odpor, tedy $1 \, \Omega$.



Obr. 2-8 Příklad metody s proudovým zdrojem $R = 1 \, \Omega$

2.3.2 Měření kondenzátorů

U měření reálných kondenzátorů je potřeba dbát na některé parazitní vlastnosti, které reálný kondenzátor, na rozdíl od kondenzátoru ideálního, má. Typickým příkladem je ESR (Equivalent Series Resistance), která může výsledky měření dosti ovlivnit.

Metod měření kondenzátorů je vcelku mnoho, nicméně spousta z nich nejde příliš automatizovat. V následujících odstavcích jsou popsány vybrané jednoduché metody pro zjišťování kapacity kondenzátorů, které jsou měřitelné digitální formou.

2.3.2.1 Nabíjení kondenzátoru přes známý odpor R

Tato metoda je vcelku jednoduchá a snadno proveditelná s mikrokontroléry. Spočívá v opakovaném nabíjení a vybíjení kondenzátoru. Při nabíjení nebo vybíjení je zapotřebí neustále sledovat úroveň nabití kondenzátoru. [4]

Metoda pracuje s časovou konstantou τ , která definuje čas potřebný k tomu, aby se kondenzátor nabil přes známý odpor R na hodnotu 63,2% z hodnoty napětí, ze které je obvod napájen (například 3,16 V při zdroji 5 V). Časová konstanta τ je dána vztahem

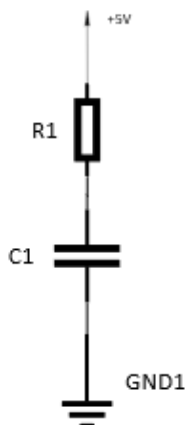
$$\tau = R \cdot C \quad [s] \quad (2.6)$$

kde:

- τ časová konstanta [s]
- R.....známý odpor [Ω]
- C.....neznámý kondenzátor [F],

Změřením doby potřebného k nabití kondenzátoru na 63,2% je možné získat časovou konstantu τ , ze které lze upravením rovnice (2.6) vypočítat přibližná kapacita měřeného kondenzátoru (za předpokladu, že kondenzátor nabíjíme ze zdroje o známém napětí a skrze rezistor R známé hodnoty). [4] Upravená rovnice 2.6:

$$C = \frac{\tau}{R} \quad [F] \quad (2.7)$$



Obr. 2-9 Zapojení metody nabíjení kondenzátoru přes známý odpor R

2.3.2.2 Využití externího obvodu NE555

Metoda s externím obvodem NE555 je spolehlivou metodou měření kapacity kondenzátorů. Díky kalibrovaným odporům uvnitř obvodu je spolehlivost metody závislá pouze na zapojení a přesnosti vnějšího obvodu, který se skládá ze dvou rezistorů R_1 a R_2 a připojeného kondenzátoru C . V případě připojení přesných odporů, je metoda závislá pouze na kapacitě C , což je v této aplikaci kýžený stav. [5]

Metoda využívá astabilního zapojení čipu NE555, při kterém je na výstupu generován čtvercový signál, jehož frekvence je přímo závislá na hodnotách kondenzátoru C , nabíjecího a vybíjecího odporu R_1 a R_2 . Vztah pro výstupní frekvenci čipu je

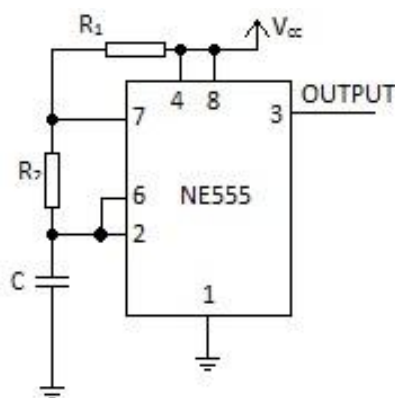
$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2) \cdot C} \quad [Hz] (2.8)$$

kde:

- f výstupní frekvence čipu [Hz]
- R_1 známý nabíjecí odpor [Ω]
- R_2 známý nabíjecí a vybíjecí odpor [Ω],

Je-li změřena výstupní frekvence čipu a odpory R_1 a R_2 jsou známé, můžeme úpravou vzorce (2.8) vyjádřit vztah pro výpočet kapacity neznámého kondenzátoru C .

$$C = \frac{1,44}{f \cdot (R_1 + 2R_2)} \quad [F] (2.9)$$



Obr. 2-10 Klasické zapojení integrovaného obvodu NE555 v astabilním zapojení

2.3.3 Měření cívek

2.3.3.1 Paralelní rezonanční obvod

V kapitolách [2.2.2](#) a [2.2.3](#) je konstatováno, že si cívka uchovává elektrickou energii v podobě magnetického pole a kondenzátor v podobě náboje. Při zapojení cívky a kondenzátoru do paralelní kombinace, následném nabití a odpojení kondenzátoru, začne obvod rezonovat tak, že kondenzátor se začne vybíjet skrze cívku, která si začne tvořit magnetické pole. Když je kondenzátor vybitý, magnetické pole cívky zkolabuje a začne opět nabíjet kondenzátor. Tento proces probíhá o frekvenci (tzv. rezonanční frekvence f_0) přímo danou hodnotami prvků L a C. [7] Rezonanční frekvenci lze spočítat jako

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.10)$$

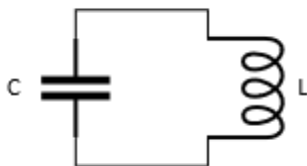
kde:

- f_0 rezonanční frekvence [Hz]
- L.....neznámá indukčnost [H]
- C.....známý kondenzátor [F],

V ideálním případě (s ideálními součástkami) by tento proces probíhal do nekonečna, protože v ideálních podmínkách nedochází ke ztrátám elektrické energie. V reálném světě proces rezonance trvá pouze omezenou dobu, protože při každém cyklu dochází ke ztrátám energie.

Při známé hodnotě kondenzátoru a změřené rezonanční frekvenci obvodu, lze jednoduše upravit vzorec (2.10) a získat vztah pro výpočet neznáme indukčnosti.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C} \quad [\text{H}] \quad (2.11)$$



Obr. 2-11 Jednoduchý rezonanční obvod

Tato metoda je aplikovatelná i při měření kondenzátorů se známou hodnotou indukčnosti L .

2.3.3.2 Měření sinusovým signálem

Metoda spočívající v připojení induktoru L_x do sériového zapojení s odporem R_s . Při aplikaci napětí sinusového průběhu se napětí na cívce bude fázově posouvat oproti napětí na generátoru. [6][7]

2.4 Integrované obvody

Integrované obvody (IC – Integrated circuit), v běžné mluvě také čipy, jsou obvody, které splňují určitou funkci a které jsou dostupné v kompaktním pouzdře pro běžné použití. Integrované obvody v sobě obsahují množství miniaturních tranzistorů, které jsou shluklé na jedné desce (od toho Integrovaný obvod), což má za následek výrazné zmenšení těchto obvodů.

Použitím integrovaných obvodů je také praktické. Použitím IC je možné výrazně zmenšit plochu projektu. Integrované obvody mají také lepší účinnost, protože dané součástky jsou blíže u sebe a jsou velmi malé. Výroba těchto čipů je levná ve velkovýrobě, protože se v dnešní době používají fotolitografické tiskárny.

Integrované obvody najdeme dnes skoro ve všech elektronických zařízeních. Od hodinek přes mobilní telefon k ovládacím terminálům NASA.

2.4.1 Mikrokontroléry

Mikrokontroléry (MCU – Microcontroller Unit) jsou malé kompaktní počítače v podobě integrovaného obvodu. Jedná se o čip, který uživateli umožňuje kontrolovat

vstupy a výstupy čipu a na základě těchto informací provádět akce. Využívají se především v projektech, které využívají automatizaci.

Mikrokontroléry se skládají minimálně z jednoho mikroprocesoru (CPU), z pamětí (RAM, EEPROM) a programovatelných vstupů a výstupů.

Existuje široká škála mikrokontrolérů od 4bitových nízkofrekvenčních mikrokontrolérů po 32bitové o vysokých frekvencích.

2.4.1.1 Jak funguje mikrokontrolér

Každý mikrokontrolér má datovou paměť flash, do které se ukládá nahraný program. Program je přeložen překladačem a je následně nahrán do paměti mikrokontroléru v podobě instrukcí, které jsou pro daný mikrokontrolér specifické. Ve většině případů mikrokontroléry od jednoho výrobce mají stejný instrukční set s mírnými rozšířeními. Tyto instrukce jsou do paměti uloženy na různé adresy chronologicky, na základě rozvržení nahraného programu.

Vnitřní programový čítač (PC – Program Counter) po inicializační sekvenci mikrokontroléru začne adresy procházet a vykonávat instrukce, které se na daných adresách nacházejí. Jednotlivé instrukce se skládají z tzv. řídicího slova (Control Word), které reprezentuje danou operaci, případně operaci s operandy. Na základě těchto instrukcí je možné měnit stavy jednotlivých registrů mikrokontroléru. [22]

2.4.1.2 ATMEL AVR

Je označení pro řadu 8bitových a některých 32bitových mikrokontrolérů od firmy ATMEL vyráběných od roku 1996. Čipy se dělí podle programové paměti, počtu vstupních a výstupních pinů a setu instrukcí, které přímo určují chování čipu.

Základní rozdělení rodiny AVR

- tinyAVR
 - o 0,5-32 KB programové paměti
 - o 6-32pinový čip
- megaAVR
 - o 4-256 KB programové paměti
 - o 28-100pinový čip
- XMEGA
 - o 16-384 KB programové paměti
 - o 44-100pinový čip

Mezi běžně používané zástupce rodiny tinyAVR patří například ATTiny85 s 8 KB programové paměti flash, který má 8 pinů. Mezi běžně používané zástupce rodiny megaAVR pak patří například ATmega328 s 32 piny a 32KB programové paměti.

Tyto čipy jsou velmi oblíbené a používané, zejména u domácích kutilů, protože jejich použití je velmi jednoduché. Jednoduchost používání spočívá v jednoduchosti programování čipů. Společnost Arduino vyvinula svůj vlastní programovací jazyk velmi podobný programovacímu jazyku C, a software Arduino IDE, který právě dokáže přeložit uživatelův kód převést do strojového jazyka, který je pro běžného uživatele složité se učit. Přeložený kód je pak jednoduché do čipu nahrát a používat jej.

2.4.1.3 Registry mikrokontroléru

Základní operace s mikrokontroléry nejen společnosti Atmel se provádí přiřazováním bitových hodnot (0,1) do registrů specificky určených pro danou funkci mikrokontroléru. Každý registr má svoji vnitřní adresu, kam je ukládána hodnota přiřazená danému registru. Na základě hodnot těchto registrů mikrokontrolér „rozhoduje“ jak se bude daný modul chovat. Vybrané základní druhy registrů:

- Pracovní registry (GPR – General Purpose Registers) – slouží pro dočasné uložení hodnot při prováděných operacích, jako je například sčítání, odečítání apod.
- I/O registry – registry sloužící pro komunikace s moduly mikrokontroléru, například pro nastavení směru datového toku na pinech apod.
- Příznakové registry (FLAGS) – registry, ve kterých jsou obsaženy příznakové bity. Slouží pro indikaci různých stavů modulů a různých operací. Příkladem příznakového bitu může být bit Zero Flag, který indikuje nulový stav (například při odečítání).

DDRx – Data Direction Register – Registr rozhodující o směru logických pinů mikrokontroléru. Bitová hodnota 0 označuje pin jako vstupní, hodnota 1 jako výstupní. Registr je 8bitový z čehož každý bit rozhoduje o směru dat na jednom pinu.

PORTx – 8 bitový registr užívaný v kombinaci s registry DDRx. Jeden bit opět reprezentuje jeden výstup. Je-li stejný bit registru DDR roven 1, pak bit v registru PORT určuje připojení výstupu na danou logickou úroveň (0 – GND, 1 – +Vcc). V opačném případě PORT určuje při hodnotě 0 stav vysoké impedance na výstupním pinu, a v hodnotě 1 připojení na interní pull-up rezistor.

PINx – Registr určený pouze ke čtení. Obsahuje logickou hodnotu momentálně se nacházející na vývodech pinu.

Registrů je v různých mikrokontrolérech spousta s různými funkcemi. Výše popsané sady registrů se mohou v různých mikrokontrolérech různých výrobců nazývat jinak, tyto jsou specifické pro mikrokontroléry ATMEL. Registry, které jsou zde popsány, považuji za registry nejdůležitější, jelikož jsou zodpovědny za řízení výstupů z mikrokontroléru a tím i řízení externích prvků k mikrokontroléru připojených. [23]

2.4.1.4 Přerušení

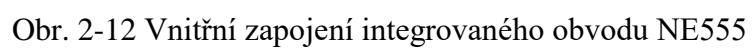
Přerušení v terminologii mikrokontrolérů znamená vystoupení programu z hlavní smyčky na základě události, která je definovaná uživatelem. Přerušení je realizováno automatickým nastavením příznakových bitů (Flagů) v registrech k tomu určených. Mikrokontrolér tyto bity průběžně kontroluje a je-li přerušení povoleno uživatelem, vyvolá provedení tzv. obsluhy přerušení (ISR – Interrupt Service Routine), což jsou instrukce předané uživatelem, které se při přerušení provedou nezávisle na právě běžícím programu.

V závislosti na události, která přerušení vyvolala je nastavena nová adresa do programového čítače, kde jsou uloženy instrukce, které se mají provést. Tyto adresy se nazývají vektor přerušení. Po vykonání ISR se program vrací na původní hodnotu adresy programové čítače a pokračuje v dosavadní činnosti.

Přerušení může být vyvoláno například přetečením časovače nebo změnou logické úrovně na vstupním pinu. [21]

2.4.2 NE555

Integrovaný obvod NE555 je hojně využíván pro generování obdélníkového signálu o různých střídách a frekvenci. Je tvořený třemi rezistory o hodnotě 5 k Ω zapojených do série tak, aby na nich vznikl rovnoměrný úbytek napětí. Hodnoty napětí mezi rezistorem a zemí jsou poté použity jako referenční napětí dvou komparátorů, které podle hodnoty nabití externího kondenzátoru spínají klopný obvod RS. Sepnutí obvodu RS nejenom sepne výstup čipu, ale také otevře tranzistor, přes který se může kondenzátor začít vybíjet. Když napětí na kondenzátoru opět klesne pod úroveň 1/3 napětí, komparátor opět sepne, čímž zavře tranzistor a uvede tak obvod do původního stavu. Tento proces se opakuje o frekvenci závislé na odporech R_1 a R_2 a kondenzátoru C. [5]



3 POSTUP NÁVRHU RLC MĚŘIČE

Tato kapitola pojednává o postupu návrhu jednotlivých součástí měřiče RLC. Kapitola srovnává jednotlivé metody a vysvětluje cestu k dopracování finálního zapojení měřiče. Popisuje postup výběru součástek a integrovaných obvodů RLC měřiče.

Schéma a návrh desky plošných spojů je vytvářen v CADovém programu (CAD – Computer Aided Design) se studentskou licencí EAGLE od společnosti Autodesk Inc. Společnost Autodesk se zabývá vývojem podpůrných programů pro vývojáře v různých oborech techniky a grafiky, od simulátoru obvodů po 3D návrhů staveb (AutoCAD) a studií pro tvorbu 3D modelů a animací (3DS MAX).

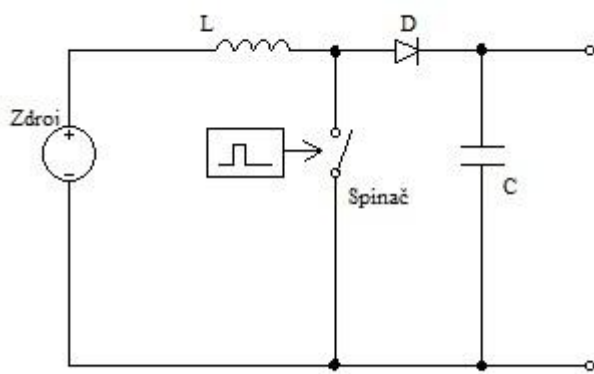
3.1 Zdrojová část

Ze zadání práce vyplývá, že měřič bude napájený z akumulátoru. Vzhledem k povaze zařízení není možné využití vícero bateriových článků, kvůli jejich rozměru. Nominální napětí takových článků, ať už technologie Li-Ion či NiCd, bývá pod 5V. Jelikož většina vybraných integrovaných obvodů vyžaduje napájecí napětí minimálně 5V, bude nutné napájecí napětí uměle navýšit nebo využít zapojení vícero článků do série. Tato možnost ale byla zamítnuta. Odpovědí na řešení tohoto problému je obvodové zapojení zvané Step-Up měnič (Boost Convertor). Měnič je schopen z menšího vstupního napětí spínáním tranzistoru připojeného na cívku napětí uměle navýšit, a to až několikanásobně krát.

3.1.1 Princip Step-Up měniče

Step-Up měnič využívá vlastnosti cívky, při které vzniká při odpojení zdroje prudký nárůst napětí, když elektromagnetické pole cívky kolabuje. Tento nárůst napětí nabíjí kondenzátor na výstupu. Cívka je neustále připojována a odpojována přes propojující spínač (ve většině realizací tuto funkci plní tranzistor MOSFET), který je neustále sepínán a vypínán kontrolním signálem s takovou frekvencí a střídou, aby se na výstupu objevovalo požadované napětí určené uživatelem. V případě připojení zátěže na výstup měniče se bude výstupní napětí měnit v závislosti na připojené zátěži. V takovém případě je nutné regulovat rychlost a střidu spínání tranzistoru v závislosti na změně zátěže. Tuto funkci zastává „kontrolní obvod“. Kontrolní obvod využívá tzv. feedbacku (zpětné vazby), který je vyveden z výstupu step-up měniče. V závislosti na velikosti zpětné vazby

kontrolní obvod upravuje spínání tranzistoru tak, aby kompenzoval jakýkoliv úbytek nebo přebytek napětí a na jeho výstupu bylo stále konstantní napětí při jakékoliv připojené zátěži. Jako „kontrolní obvod“ lze použít mikrokontrolér, což je jednodušší varianta, popřípadě složitější obvod.



Obr. 3-1 Jednoduchý princip Step-Up měniče

3.1.2 Realizace zdroje

V závislosti na zvolených obvodech užitých pro realizaci RLC měřiče je potřeba vytvořit zdroj, který je schopen spolehlivě napájet každý obvod bez kolísání napětí a snést proudový odběr zařízení. Zdroj musí vyhovovat všem požadavkům.

Požadavky na zdroj pro měřič RLC:

- Schopnost převodu nominálního napětí článku na +5 V
- Integrovaná ochrana bateriového článku proti přepětí, opačné polaritě a podbití
- Převod napětí z +5 V na -5 V

3.1.2.1 Zdroj +5 V

Pro realizaci zdroje +5 V bylo na výběr z několika možností přístupu k návrhu zdroje. Zdroj +5 V bude základním napájecím zdrojem pro všechny obvody RLC měřiče

Sestrojení vlastního step-up měniče s využitím mikrokontroléru pro řízení zpětné vazby.

Výhody:

- Možnost volby výstupního napětí

Nevýhody

- Vyšší počet potřebných součástek k sestrojení obvodu
- Potřeba využití dalšího mikrokontroléru pro řízení spínání tranzistoru a s tím spojená práce navíc při programování
- Nižší účinnost obvodu
- Cena spojená s počtem komponent a využitím rychle spínacího tranzistoru MOSFET

Tato možnost nebyla zohledněna vzhledem k porovnání náročnosti návrhu, cenové relace sestrojení takového obvodu a při zohlednění dalších možností výběru zdroje.

Využití step-up měniče se specializovaným integrovaným obvodem pro řízení výstupního napětí měniče ze zpětné vazby.

Výhody:

- Poměrně nízká cenová relace
- Jednoduché sestrojení s využitím pár externích komponent
- Možnost volby výstupního napětí
- Vyšší účinnost obvodu, díky specializovanému zapojení integrovaného obvodu

Nevýhody:

- Neobsahují moduly pro správu baterie a nabíjení
- Volba výstupního napětí závislá na nastavení potenciometru u zpětné vazby

U této možnosti byl vyzkoušen modul s integrovaným obvodem MT3806. Při připojení baterie a dodržení pokynů udaným výrobcem, modul nefungoval. Celkově byly vyzkoušeny 4 moduly s tímto obvodem, z nichž ani jeden nebyl funkční. Z různých internetových zdrojů bylo vyčteno, že spolehlivost tohoto modulu není vysoká, proto byla tato možnost zamítnuta.

Využití integrovaných obvodů přímo určených pro správu baterií a powerbank

Výhody:

- Stabilní výstup +5 V bez nutnosti nastavování
- Integrovaná ochrana a správa baterie
- Integrované nabíjení baterie
- Jednoduché sestrojení s využitím pár externích komponent
- Vyšší účinnost obvodu, díky specializovanému zapojení integrovaného obvodu

- Některé funkce navíc
- Nízká cenová relace

Nevýhody:

- Výstupní napětí nelze ve většině případů volit

U této varianty byl vyzkoušen integrovaný obvod IP5108 od čínského výrobce INJOINIC. Čipem může téct proud až 2 A (udáváno výrobcem). Modul se využívá pro správu Li-Ion baterií v powerbankách a mobilních zařízeních. Modul v sobě má integrované rozhraní pro komunikaci s mikrokontrolérem skrze protokol I²C, tudíž dále není zapotřebí řešit budoucí monitoring baterie jiným obvodem. IP5108 se stará o kompletní správu baterie, od monitoringu napětí přes ochranu proti podbití a přebití po zvyšování výstupního napětí na +5 V. Čip je dostupný v pouzdře SOP-16. [9]

Varianta zdroje s tímto obvodem byla sestrojena na univerzálním pájivém poli, kde byl obvod testován. Správa baterie obvodu fungovala správně, stejně jako nabíjení baterie skrze obvod. Co bohužel nefungovalo dle očekávání, bylo přímá step-up konverze napětí baterie na výstupní napětí +5 V. Při připojení integrovaného obvodu k napájení k nabití baterie obvod fungoval správně, po odpojení externího napájení obvod chvíli držel výstupní napětí z obvodu na +5 V, po chvíli (cca 3 minuty), ale přestal a napětí na výstupu kleslo na nulu. Toto chování přisuzuji parazitním vlastnostem pájivého pole, kdy při spínací frekvenci step-up měniče v čipu 2 MHz dochází k ovlivňování signálu vnějšími vlivy parazitních vlastností pájivého pole.

Varianta zdroje s integrovaným obvodem IP5108 byla zvolena jako finální varianta zdroje +5 V RLC měřiče. Nabíjení bateriového Li-Ion článku je vyřešeno microUSB konektorem pro připojení nabíjecího napětí +5 V z jakéhokoliv jiného zdroje (počítač, nabíječka na telefon apod.).

3.1.2.2 Zdroj -5 V

Jelikož některé součástky, zejména operační zesilovače a analogové přepínače, vyžadují pro svoji funkci napájení ze symetrického zdroje pro přenos sinusových signálů, je nutné do zdrojové části promítnout i zdroj -5 V.

Z různých obvodů podobných vlastností byl vybrán integrovaný obvod MAX764 od společnosti MAXIM Integrated. Čip je napájen z +5 V zdroje a na výstupu generuje napětí opačné polarity -5 V se spínací frekvencí 300 kHz. Maximální výstupní proud z čipu je

250 mA, což je pro tuto aplikaci RLC měřiče více než dostačující. Čip je dostupný v balení DIP8 i v balení SO8. [10]

Obvod s MAX764 byl sestaven na pájivém poli a jeho funkčnost byla ověřena napájením operačních zesilovačů PGA207 a PGA103 firmy Texas Instruments. Obvod nevykazoval žádné známky kolapsu ani nestability.

3.1.2.3 Zdroj +12 V

Vzhledem k umístění zdroje +5 V a -5 V na samostatné desce byl na desku umístěn ještě zdroj +12V realizován integrovaným obvodem SDB658, který sice nesouvisí s projektem RLC měřiče, ale mohl by být k užitku v jiných projektech využívajících +12 V.

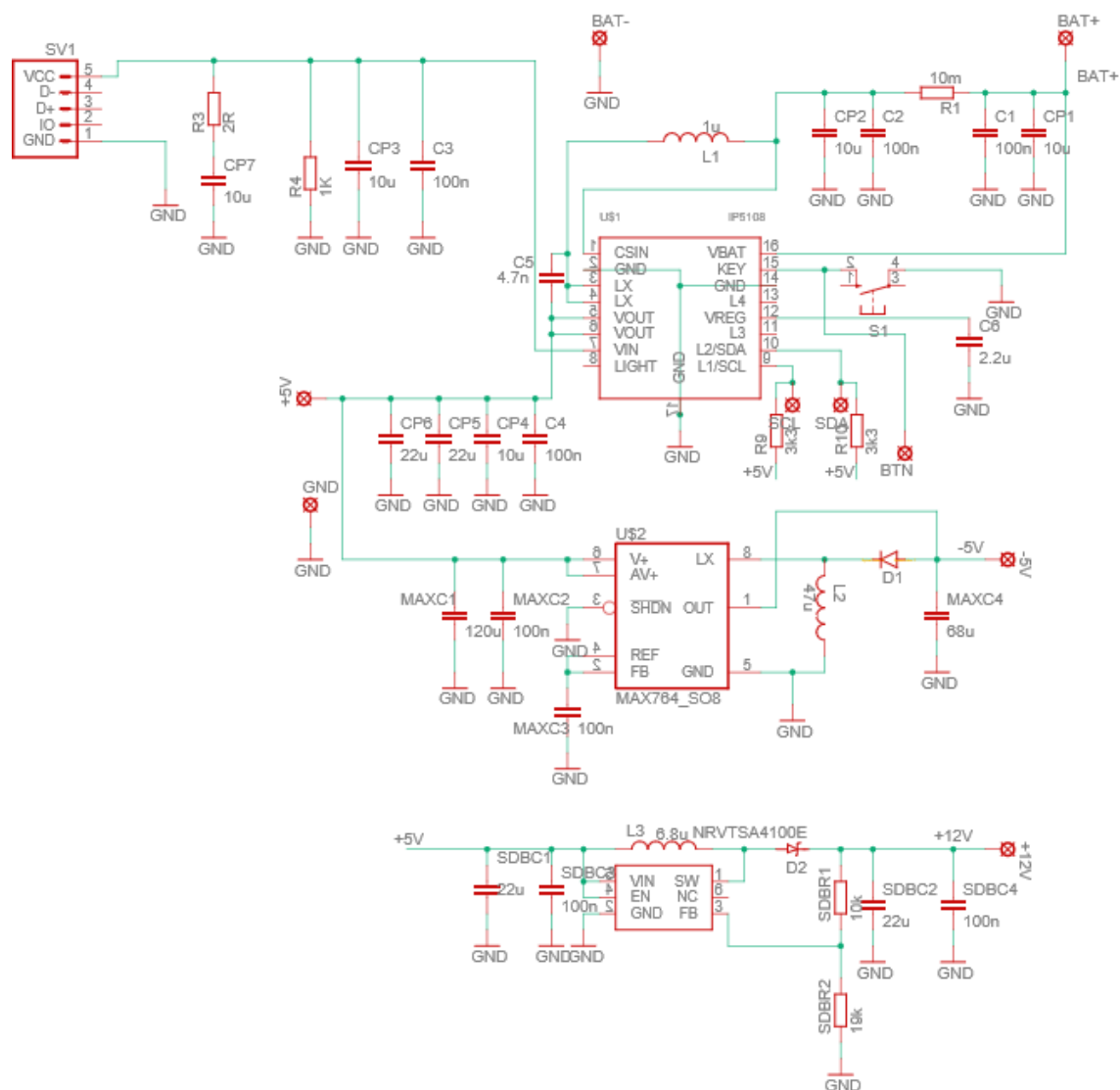
3.1.2.4 Konečný návrh zdroje

Finální návrh zdroje bude využívat obvody:

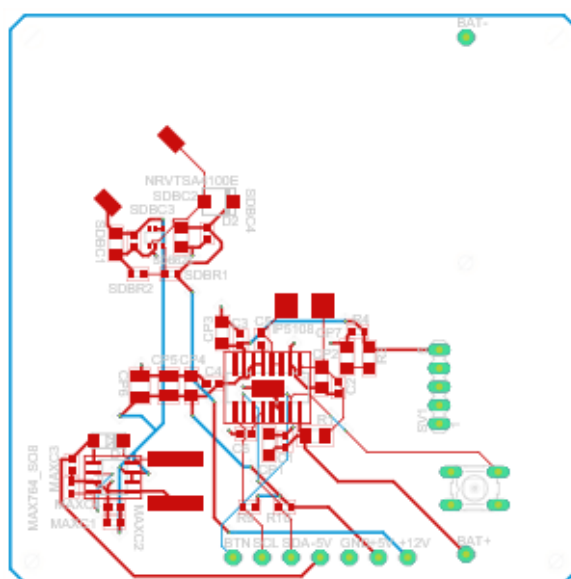
- IP5108 – zdroj +5 V
- MAX764 – zdroj -5 V
- SDB658 – zdroj +12 V

Zdroj jako takový je umístěn na samostatné desce mimo měřicí část měřiče, aby docházelo k co nejmenšímu ovlivňování měření spínacími frekvencí převodních obvodů a také, aby byl zdroj univerzální a dal se použít i v dalších projektech.

Pro napájení zdroje bude využita baterie, která se bude nabíjet z externího zdroje napětí +5 V. Výstup z IP5108 bude využit k napájení ostatním převodníků napětí, které vyžadují napájecí napětí +5 V. Výstupní napětí ze všech obvodů (včetně zemního signálu GND) budou vyvedeny na jednu stranu desky, společně se signály datovými určenými pro komunikaci čipu IP5108 s mikrokontrolérem a signálem pro externí připojení tlačítka spuštění zdroje.



Obr. 3-2 Zapojení zdrojové části RLC měřiče



Obr. 3-3 Návrh desky plošného spoje pro zdrojovou část

3.2 A/D převodník

A/D (Analog to Digital) převodník je obvod, který dokáže analogovou hodnotu signálu převést na hodnotu digitální. V případě aplikace digitálního měřiče RLC součástek je nutné použít převodník, protože digitální zařízení neumějí s analogovými hodnotami pracovat. A/D převodníky existují v různých bitových kombinacích, které přímo definují preciznost převodníku. Čím více bitů, tím je převodník preciznější. A/D převodník převede vstupní analogovou hodnotu na hodnotu digitální podle referenčního napětí a počtu bitů se kterými operuje.

Požadavky na AD převodník:

- Dostatečná přesnost a rozlišení pro měření statického napětí na odporech
- Vyšší převodová rychlost pro měření kondenzátorů
- Filtrace náhodných špičkových výkyvů napětí.

Pro různé aplikace v systému měřiče bylo zohledňováno několik AD převodníků vyhovujících jednotlivým aplikacím pro měření.

ADS1115 je 16bitový AD převodník od firmy Texas Instruments s programovatelnou rychlostí převodu od 8 do 860 vzorků za sekundu. Převodník komunikuje s logickou jednotkou přes protokol I²C. Převodník integruje 4 kanály pro měření analogové hodnoty.

Výhody:

- Integrace komunikačního protokolu I²C
- Více kanálů k měření
- Integrovaný zesilovač
- Programovatelná rychlost měření
- Široká variabilita z hlediska napájecího napětí
- 16 bitové rozlišení

Nevýhody:

- Pro některé aplikace pomalý převod v kombinaci s relativně pomalým komunikačním protokolem
- Nelze volit referenční napětí pro převodník
- Vyšší cena převodníku

Tento převodník nebyl zvolen z důvodu absence volby referenčního napětí pro převod analogové hodnoty do digitální.

Převodník **LTC2451** je AD převodník s 16bitovým rozlišením firmy LINEAR Technology. Převodník má integrovaný vnitřní oscilátor a implementované komunikační rozhraní I²C. Převodník je schopný v závislosti na jeho naprogramování až 60 převodů na sekundu. Na rozdíl od převodníku AD1115, LTC2451 umožňuje nastavení spodního a horního prahu rozsahu napětí reference na pinech REF+ a REF-. LTC2451 je převodník typu $\Delta\Sigma$ (delta-sigma) a je dostupný v balení TSOT-23. [11]

Výhody:

- Dobrá linearita a přesnost převodu díky konfiguraci $\Delta\Sigma$
- Integrace komunikačního protokolu I²C
- Možnost volby horního i spodního prahu referenčního napětí
- Nízká cena převodníku
- Široká variabilita z hlediska napájecího napětí
- 16bitové rozlišení

Nevýhody:

- Nízká rychlost – nehodí se pro měření rychle se měnícího napětí na vstupu
- Jediný kanál pro měření

I přes nízký počet vzorků za sekundu byl převodník aplikován. U měření odporů se totiž napětí stabilizuje a nijak se nemění, což je pro převodník ideální. Převodník byl vyzkoušen s napájecím napětím +5 V a horním prahem reference 4.096 V. Změřené hodnoty převodníkem přímo korespondovaly s napětím zobrazeným komerčním multimetrem.

Co se týče rozlišení převodníku domnívám se, že 16bitové rozlišení je dostatečné, jelikož po dosazení do rovnice 3.1 lze zjistit, že převodník je schopný od sebe odlišit hodnoty s krokem 62,5 μ V.

$$\Delta_U = \frac{U_{REF}}{2^n} = \frac{4,096 V}{65535} = 62,5 \mu V \quad [V](3.1)$$

kde:

- | | | |
|--------------------|-----------------------|------|
| - Δ_U | krok | [V] |
| - U_{REF} | referenční napětí | [V] |
| - n | počet bitů převodníku | [-], |

Převodník tudíž považuji za přesný a bude využit pro měření napětí na měřených odporech v RLC měřiči.

Integrovaný převodník mikrokontroléru ATMEGA328P je další varianta převodníku. Převodník má 10bitové rozlišení a dosahuje maximální rychlosti až k desetitisícům vzorků za sekundu. Díky implementaci převodníku v balení mikrokontroléru není zapotřebí dalšího integrovaného obvodu. [18]

Výhody:

- Integrace v pouzdře mikrokontroléru
- Vysoká rychlost převodu (až desítky tisíc vzorků za sekundu)
- Slušná přesnost
- Více kanálů pro měření
- Vysoká možnost konfigurace rychlosti a přesnosti převodu, stejně jako napěťové reference převodníku

Nevýhody:

- Existují přesnější převodníky
- 10 bitové rozlišení oproti předchozím převodníkům

Vzhledem k rychlosti převodu převodníku byl převodník vyzkoušen v aplikaci měření kondenzátorů metodou nabíjení. I přes 10bitové rozlišení je převodník schopný spolehlivě detekovat aktuální napětí na kondenzátoru. Jelikož u metody měření kondenzátorů není zapotřebí vysoká přesnost převodníku, ale spíše rychlost převodu z důvodu odečtení času od počátku nabíjení kondenzátoru po přeběhnutí hraniční hodnoty (viz kapitola [2.3.2.1](#)), považuji tento převodník za dostatečný pro účely měření kondenzátorů a hodnot nesouvisející s přesností převodníku.

Kanál 0 převodníku bude využit pro interakci zařízení s uživatelem pomocí tlačítek, kanál 1 k měření kondenzátorů a kanál 2 k měření cívek. Zbylé kanály převodníku budou nevyužity

3.3 Zpřesnění měření napěťovou referencí

Při činnosti různých obvodových prvků (spínání mikrokontroléru apod.) nebo v závislosti na teplotě může docházet ke kolísání napájecího napětí. Ve většině případů zdroj napětí není dokonalý a tak je možné se setkat při proměření zdroje s hodnotami lehce nižšími nebo vyššími, než je nominální napětí. Například je běžný jev naměřit na běžném zdroji pro nabíječku telefonu napětí 5,2 V nebo 4,9 V. Ve většině aplikací tato skutečnost není žádný problém, jelikož integrované obvody jsou s tímto předpokladem navrhovány a jejich správnému chodu nijak nevadí, ale v aplikacích jako je tento projekt RLC měřiče,

kde je přesnost důležitá se jedná o problém, který je nutné adresovat, aby bylo možné součástky správně změřit nezávisle na kolísání napětí napájecího zdroje.

V projektu byl tento problém vyřešen využitím napěťové reference **MCP1501** od firmy Microchip. MCP1501 je napěťová reference o různých nominálních napětích, v aplikaci měřiče ve verzi s napětím 4,096 V. Reference je dostupná v různých pouzdech. Pro moji aplikaci bylo zvoleno šesti-vývodové pouzdro SOT-23. [12]

Napěťová reference bude využita jako zdrojové napětí pro referenční odpory ke měření odporů a jako referenční napětí pro převodník LTC2451.

Maximální proudový odběr z reference je 30 mA což je zapotřebí zohlednit při výběru odporové sítě pro měření.

3.4 Měření odporů

K měření odporů byla využita metoda děliče napětí, kdy se napětí rovnoměrně rozdělí mezi odpory ve smyčce (viz kapitola [2.3.1.1](#)).

Referenční odpory jsou připojeny na referenční napětí z integrovaného obvodu MCP1501 popsaného výše. To zajistí stabilní zdroj napětí, jehož nominální hodnota napětí je známá a neměnná, který bude napájet děličovou smyčku. Jako referenční odpory jsou využity odpory s co nejvyšším poměrem přesnost/cena.

Nejnižší prvek odporové dekády musí mít takovou velikost, aby i při nejnižším rozsahu nebyla překročena hranice maximálního proudu, který je napěťová reference schopna dodávat, tedy 30 mA. Nejnižší prvek tedy nesmí být menší než 136 Ω . Zároveň je ale důležité, aby nejmenší prvek řady byl co nejblíže této hranici, pro zlepšení přesnosti měření odporů malých hodnot.

Tabulka 1 Hodnoty odporů

#	Teoretická hodnota	Reálně užitý odpor	Přesnost
1	150 Ω	150 Ω	0,1%
2	730,43 Ω	750 Ω	0,1%
3	3 556,89 Ω	3 600 Ω	0,1%
4	17 320,51 Ω	16 900 Ω	0,1%
5	84343,27 Ω	82 500 Ω	0,1%
6	410 714,7 Ω	470 000 Ω	0,1%
7	2 000 000 Ω	2 000 000 Ω	1%
8	10 000 000 Ω	10 000 000 Ω	1%

Nejbližší nejnižší vyhovující požadavkům je odpor $150\ \Omega$. Jelikož křivka požadované přesnosti roste logaritmicky (U hodnot v řádu desítek až stovek $k\Omega$ není zapotřebí přesnost na desetiny a jednotky Ω tak, jako tomu je u hodnot stovek a desítek Ω), další odpory v řadě byly zvoleny v logaritmické závislosti na nejnižším odporu.

3.4.1 Přepínání rozsahů měření odporů

Při přepínání rozsahů pro měření odporů musí být aktivní pouze jeden odpor. V důsledku připojení odporů na napěťovou referenci, nemohou být odpory přímo připojeny na a kontrolovány výstupy mikrokontroléru, který operuje s logickými hodnotami +5 V, zatímco odpory musejí být připojené na napětí 4,096 V. Zároveň by bylo dobré ušetřit výstupy mikrokontroléru pro jiné účely než ke spínání odporů. Řešením problému je integrovaný obvod zvaný multiplexor.

Multiplexor je obvod na principu přepínače, který na základě binární hodnoty připojené na ovládací vstupy (adresy) mění propojení vstupů a výstupů z něj. Ovládání logické úrovně adresních vstupů mikrokontrolérem umožňuje efektivní přepínání větví obvodu a zároveň snižuje počet potřebných výstupních pinů z mikrokontroléru. Nevýhodou aplikace multiplexorů u měřicí techniky je parazitní vlastnost spínacího odporu, který je potřeba zohlednit v softwarové části při měření malých odporů.

Požadavky na multiplexor:

- Možnost úplného odpojení z obvodu
- Minimálně 8 možných kombinací propojení se společným výstupem pro každý referenční odpor (poměrově 8:1).
- Podpora logických úrovní mikrokontroléru (0 V a +5 V) na adresních vstupech.
- Vzhledem k aplikaci, nízký spínací odpor

Pro potřeby projektu byl vybrán multiplexor CBT3251 vyráběný firmou NEXPERIA. Multiplexor je v poměru 8:1 tedy jeden společný výstup a 8 samostatných vstupů. CBT3251 podporuje plné odpojení z obvodu nastavováním vstupu Output Enable, který je aktivní v poloze 0 V. Multiplexor využívá 3 adresní bity (S0 – S2) pro přepínání mezi jednotlivými vstupy. Spínací odpor obvodu je výrobcem uváděn $<5\ \Omega$. Doporučené napájecí napětí je +5 V. Obvod je k dostání ve dvou pouzdrech, pro účely měřiče bylo vybráno pouzdro SO16. [13]

Schéma zapojení je stejné jako v případě měření kondenzátorů (obr. 3.4).

3.5 Měření kondenzátorů

Pro měření kondenzátorů byly vyzkoušeny 2 metody měření.

3.5.1 Měření kondenzátorů v zapojení s obvodem NE555

Při této metodě byl využit integrovaný obvod NE555, společně s odporovou sítí pro měření odporů a známým vybíjecím odporem R_2 1 k Ω .

Po sestavení obvodu na univerzálním pájivém poli odvod po připojení kondenzátoru vydával čtvercový signál o frekvenci proporcionální k velikosti kapacity připojeného kondenzátoru. Tato skutečnost byla ověřena výpočtem teoretické frekvence dle rovnice [2.9](#). a osciloskopem s funkcí výpočtu frekvence signálu.

Po připojení výstupního signálu na vstupní pin ICP (Input Capture Pin) a INT1 mikrokontroléru ATMEGA328P, docházelo z neznámých důvodů k výraznému zkreslování a nepřesnosti při měření.

Prvotním pokusem bylo měření délky periody s využitím vstupu mikrokontroléru generující přerušení (INT1). Z neznámých důvodů se generovalo přerušení náhodně i při ověření správné pinové konfigurace registrů DDR a PORT.

Druhým pokusem bylo měření počtu pulzů a výpočet frekvence. Výstup z NE555 byl připojen na vstupní pin mikrokontroléru ICP, který v závislosti na konfiguraci zajišťuje zaznamenávání časové značky události (v tomto případě změnu logické hodnoty při náběžné hraně). Při evaluaci metody se zdálo, že pin ICP není schopen v této aplikaci spolehlivě měřit počet pulzů. Domnívám se, že tato skutečnost může být způsobena špatným softwarovým nastavením nebo tím, že díky čištění příznakových bitů, které trvá na poměry ostatních operací déle, dochází ke zkreslení hodnot zaznamenaných modulem ICP.

Tato metoda byla z důvodu špatné funkčnosti opuštěna, ale vzhledem k vývoji projektu byla do projektu zahrnuta jako alternativní možnost měření, pokud by se podařilo softwarovou konfiguraci opravit.

3.5.2 Měření kondenzátoru nabíjením přes odpor R

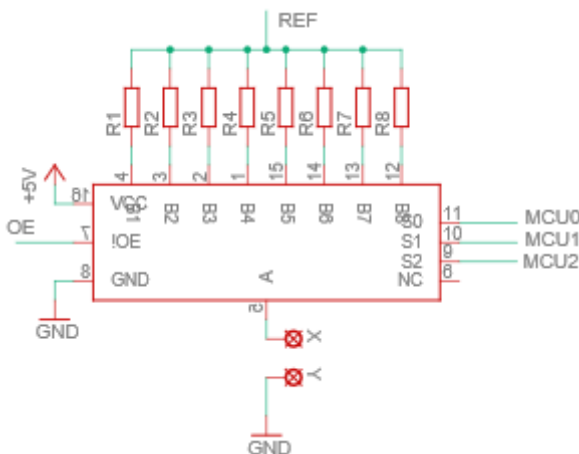
V této metodě nebylo využito integrovaných odvodů, pouze odporové sítě pro měření odporů.

Adresními bity obvodu CBT3251 je možné volit hodnotu odporu připojeného do obvodu a tedy odpor, přes který se bude kondenzátor nabíjet. Velikost časové konstanty

nabití kondenzátoru (τ) je přímo závislá na velikosti nabíjecího odporu a velikosti kapacity kondenzátoru C viz rovnice [2.6](#).

Uvnitř mikrokontroléru je spuštěn časovač a bezprostředně poté je nabíjecí odpor připojen do obvodu. Vnitřní převodník mikrokontroléru v rychlé konfiguraci (desítky tisíc vzorku za sekundu) monitoru je aktuální stav nabití kondenzátoru. Při dosažení úrovně nabití 62% je časovač zastaven a z jeho hodnoty vypočítána výsledná kapacita kondenzátoru. Vzhledem ke známému napájecímu napětí z reference 4,096 V je možné vypočítat úroveň napětí, při které je časovač zastaven.

Metoda byla vyzkoušena na univerzálním pájivém poli a mikrokontrolérem ATMEGA328P. Metoda se prokázala jako spolehlivá a proto je použita jako primární metoda pro měření kondenzátorů v aplikaci RLC měřiče.



Obr. 3-4 Zapojení větve pro měření odporů a kondenzátorů

3.6 Měření cívek

Vybrání metody pro měření cívek mi zabralo velké množství času. Vzhledem k povaze projektu stolního měřiče by bylo nevhodné využívat větších součástek jako je relé, které spíná okruhy bez vyššího ohmického odporu na přepínací části. Bylo tedy nutné vybrat metodu měření, která není ovlivněna přidaným spínacím odporem digitálních přepínačů a která je dostatečně spolehlivá a jednoduchá pro správnou identifikaci a změření cívky. Z tohoto důvodu bylo zvažováno více metod pro měření indukčností. Nakonec jich bylo vybráno a vyzkoušeno několik.

3.6.1 Využití přechodového jevu na cívce a převod na frekvenci

Tento obvod byl sestaven jako analogie převodu kapacity na frekvenci pomocí obvodu NE555. [5][7]

Popis použitých obvodů:

INA826 – přístrojový zesilovač firmy Texas Instruments

- Šířka pásma 1 MHz
- Napájecí proud 200 μ A
- Napájecí napětí 3 V až 36 V nebo $\pm 1,5$ V až ± 18 V
- Rozsah výstupního napětí tzv. rail to rail

DG9426 – čtyřnásobný SPST přepínač firmy Vishay

- Napájecí napětí 3 V až 16 V nebo ± 3 V až ± 8 V
- Odpor při sepnutí 1,6 Ω
- Maximální proud 100 mA
- Čas sepnutí 46ns

LM393 – dvojnásobný komparátor firmy Texas Instruments

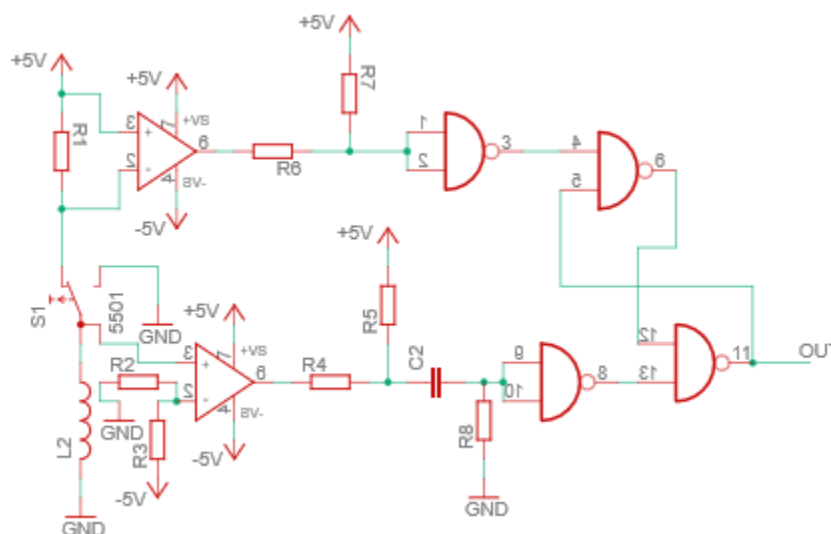
- Napájecí napětí 3 V až 36 V nebo $\pm 1,5$ V až ± 18 V
- Doba odezvy 1 μ sec
- Napájecí proud 200 μ A každý komparátor

SN74HC00 – 4x hradlo NAND

V zapojení ve schématu 3-5 je magnetické pole cívky střídavě nabíjeno přes přepínače S1 (normally closed) a S2 (normally open) obvodu DG9426. Tyto přepínače jsou společně ovládány výstupem klopného obvodu vytvořeného ze 4 hradel NAND obvodu 74HC00. Ve fázi nabíjení magnetického pole na cívku přivedeno napětí 5 V přes přepínač S1, proud cívku snímán přístrojovým zesilovačem INA826 na odporu R1 a napětí je přivedeno na komparátor. Po dosažení nastavené úrovně proudu komparátor překlopí klopný obvod a přepínače S1, S2. Ve fázi vybíjení magnetického pole je proud cívku snímán přímo na vnitřním odporu přepínač S1. Po zmenšení proudu pod nastavenou úroveň je pomocí RC členu vygenerován krátký impuls pro překlopení klopného obvodu a přepnutí přepínačů S1, S2 zpět na nabíjení pole. Takto zapojený obvod není samozřejmě přímou analogií zapojení s NE555 a kondenzátorem. Pro dosažení přímé analogie by bylo nutné přesunout snímací odpor proudu přímo do obvodu cívky. Znamenalo by to zjednodušení nastavení komparačních úrovní a klopného obvodu.

Nevýhodou této úpravy je zvýšení odporu a tudíž zkrácení doby doběhu proudu. Další zásadní nevýhodou je, že při použití této metody v zařízení by snímací odpor byl v sérii s měřenými součástkami.

Obvod byl sestaven na univerzální desce. Maximální velikost proudu byla nastavena na 90mA (maximum obvodu DG9426 je 100 mA). Pro dosažení použitelných frekvencí je nutno nastavit minimální velikost proudu (úroveň komparátoru K2) na velmi malou hodnotu. Obvod byl otestován s indukčnostmi několika hodnot. Obvod generoval signál s frekvencí závislou na použité indukčnosti. Problém u tohoto zapojení je stanovení převodu frekvence na indukčnost. Vzhledem k nastavení doběhu proudu na velmi malou úroveň je křivka změny proudu v čase v této oblasti velmi plochá. Malá odchylka v nastavení komparátoru K2 znamená velkou změnu frekvence. Z tohoto důvodu nelze stanovit převod frekvence na indukčnost teoreticky. Uvedené zapojení by bylo možno použít, pokud by byly k dispozici přesně změřené indukčnosti různých velikostí a stanovit převodní křivku měřením. Vzhledem k tomu, že tato metoda nebyla dále použita, nebyl řešen počáteční stav obvodu tj. zajištění sepnutí S1 při startu měření.



Obr. 3-5 Zapojení využití přechodového jevu

3.6.2 Měření rezonanční frekvence paralelního obvodu LC

Při rezonanční frekvenci paralelního LC obvodu je reaktance cívky a kondenzátoru v absolutní hodnotě rovna:

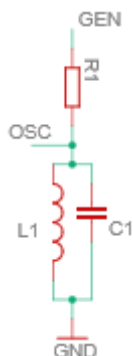
$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{1}{2 \pi \cdot f \cdot C} \quad (3.2)$$

Úpravou vzorce získáváme rovnici [2.11](#).

Pro vyhodnocení rezonanční frekvence obvodu byly vyzkoušeny 2 metody.

3.6.2.1 Měření amplitudy signálu na paralelním obvodu LC

Při rezonančním kmitočtu má paralelní obvod LC největší impedanci (v případě ideálních prvků LC nekonečnou). Měníme-li v zapojení obrázku 3-6 frekvenci signálu generátoru a měříme-li amplitudu signálu na paralelním obvodu LC v bodě maxima amplitudy je rezonanční frekvence LC obvodu. Toto zapojení bylo testováno funkčním generátorem a osciloskopem. Vrchol amplitudy byl relativně plochý, nicméně se dal odečíst s dostatečnou přesností. [7]



Obr. 3-6 Zapojení měření amplitudy signálu

3.6.2.2 Detekce fáze signálu na paralelním obvodu LC

Při rezonančním kmitočtu je fázový posun proudu a napětí na LC obvodu roven 0.

Použité obvody:

- INA826, LM393 viz výše
- 74HC86 čtyřnásobné hradlo XOR

V zapojení obrázku 3-7. je fáze proudu snímána přístrojovým zesilovačem INA826 na odporu R1, sinusový průběh proudu je převeden komparátorem K1 na obdélníkový a přiveden na vstup hradla XOR. Napětí na LC obvodu je komparátorem K2 převedeno na obdélníkový průběh a přivedeno na druhý vstup hradla XOR. Na výstupu hradla je signál se stejnou frekvencí jako signál generátoru. Šířka pulsu odpovídá času, kdy proud a napětí na LC obvodu nemají stejnou polaritu. Při rezonanční frekvenci LC obvodu je tudíž šířka pulsů 0. Tato metoda byla experimentálně ověřena na univerzální desce. [7]

Přesnost měření pomocí rezonance obvodu LC závisí na přesnosti hodnoty kondenzátoru a přesnosti vyhodnocení rezonanční frekvence. Při vyhodnocení na osciloskopu se zdála metoda fázového posunu jednoznačnější.

Výhody metody:

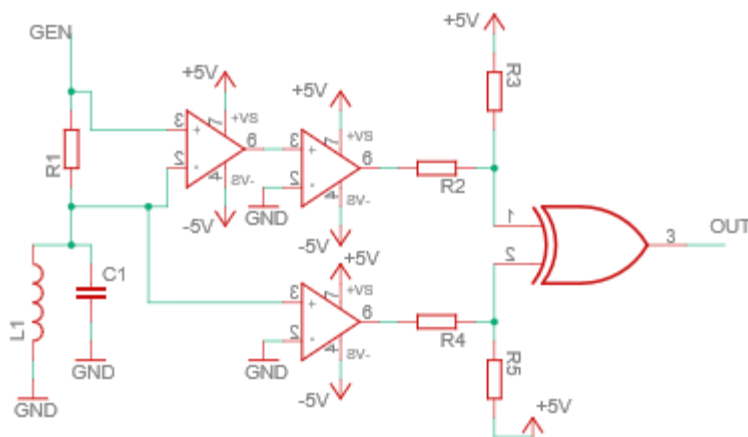
- Přesnost asi největší z uvažovaných metod (kondenzátor lze změřit poměrně přesně)

- Možnost připojit například pomocí obvodu DG9424 (4xSPST normally open) různé kondenzátory a použít i jejich paralelní kombinace

Nevýhody metody:

- Nutnost připojit na měřenou součástku další obvod
- Zdlouhavé a složité hledání rezonanční frekvence

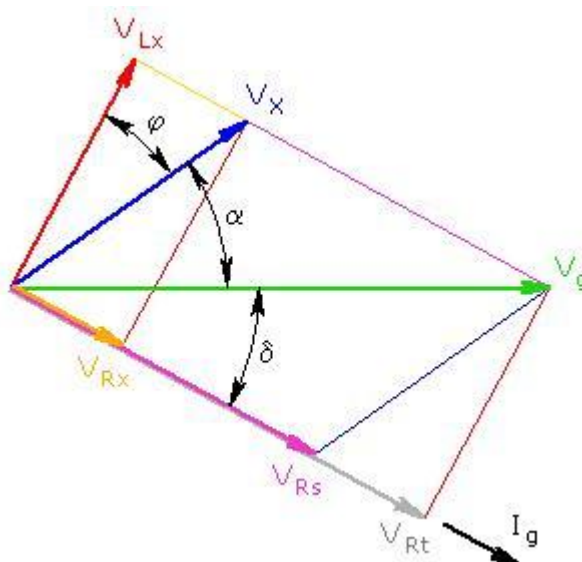
Tato metoda nebyla použita právě nutnost naprogramování algoritmu vyhledávání rezonanční frekvence



Obr. 3-7 Zapojení detekce fáze na paralelním obvodu LC

3.6.3 Měření impedance cívky při sinusovém signálu

Do sériového obvodu RL pouštíme signál z generátoru. Měříme amplitudu jak na odporu R, tak na cívce L. Ohmický odpor cívky změříme pomocí metody měření odporů. Průběhy napětí v obvodu ukazuje obr. 3-6, kde U_g je napětí generátoru, U_{R_x} na ohmickém odporu cívky a U_x naměřené napětí. [7]



Obr. 3-8 Průběhy napětí v sériovém obvodu RL

Pro proud obvodem platí:

$$I_g = \frac{U_{Rs}}{R} \quad [A](3.3)$$

Pro napětí na cívce V_{Lx} platí

$$U_{Lx} = \sqrt{U_x^2 + (I_g \cdot R_L)^2} \quad [V](3.4)$$

Reaktance cívky X_L

$$X_L = \frac{U_{Lx}}{I_g} \quad [\Omega](3.5)$$

Indukčnost cívky L

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad [H](3.6)$$

3.7 Generátor sinusového signálu

Jako generátor sinusového signálu byl zvolen obvod **AD9833** firmy Analog Devices. Generátor AD9833 je funkční generátor s rozlišením 0,1 Hz a možností volby výstupní frekvence 0 až 12,5 MHz a také fáze signálu. Generátor je ovládaný komunikačním protokolem SPI. Krom napájení 2,3 V – 5,5 V, vyžaduje připojení externího hodinového signálu rychlosti 25 MHz. Obvod je schopen provádět široký rozsah jednoduchých i složitých modulací. Interní obvody AD9833 se skládají z

- Digitálně řízeného oscilátoru
- Frekvenčního a fázového modulátoru

- Tabulky průběhu funkce sinus
- DA převodník

Výstupem generátoru jsou vlny sinusového, trojúhelníkového a obdélníkového tvaru. Amplituda signálu je přibližně 0,6 V. [14]

3.8 Spojení měřících obvodů

Vzhledem k zadání projektu, kdy má být měřič jednosvorkový bylo potřeba vymyslet spojení všech výše popsanych obvodů a metod. Odpovědí na tuto otázku jsou přepínače s nízkým spínacím odporem.

Požadavky na spínače:

- Přepínání digitálního signálu s co nejnižším spínacím odporem
- U spínače generátoru plné propouštění sinusového signálu se zápornou polaritou
- Ovladatelnost pomocí logických úrovní mikrokontroléru (0 V a +5 V)
- Nižší cena

Pro aplikaci v měřiči byly z mnoha kandidátů na trhu vybrány dva přepínače.

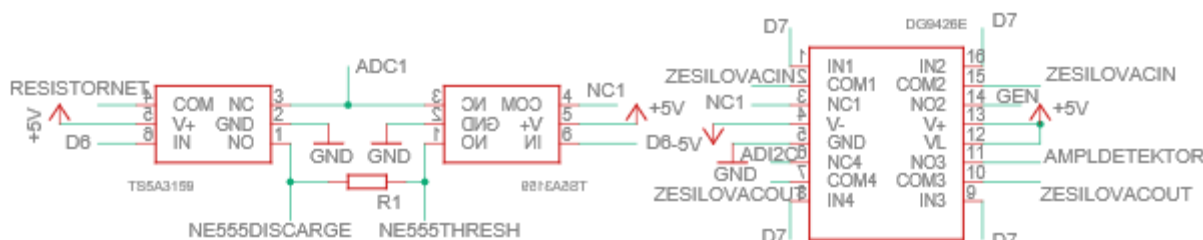
Přepínač **TS5A3159** od firmy Texas Instruments je přepínač s nízkou hodnotou spínacího odporu $< 1\Omega$ a spínací logikou +5 V. Spínač má jeden společný výstup a dva oddělené vstupy, z nichž jeden je v běžném provozu připojen a druhý odpojen (NO – Normally Open, NC - Normally Closed). Změnou logické úrovně na vstupu IN dojde k sepnutí spínače, což způsobí připojení vstupu NO a odpojení vstupu NC. Napájecí napětí spínače může být mezi hodnotami +1,65 V – +5,5 V. Obvod je dostupný v pouzdře SOT-23. [15]

Pro potřeby měřiče budou využity dva přepínače TS5A3159, které budou využity pro připojování integrovaného obvodu NE555 s vybíjecím odporem do obvodu.

Přepínač **DG9424E** od firmy Vishay je obousměrný rail to rail čtyř-přepínač schopný přenášet napětí o záporné polaritě s nízkým spínacím odporem $< 1,6\Omega$. DG9424 v sobě implementuje celkem 4 spínače, každý s vlastním ovládacím vstupem. Dva spínače jsou ve stavu NC – při přivedení logického signálu na jejich vstupy se rozpojí (NC1, NC4) – a dva jsou typu NO (NC2, NC3). Výstup ze spínačů je označován jako COM₁ – COM₄.

Po spojení dvou výstupních pinů COM₁ s COM₂ a COM₃ s COM₄ a spojení vstupních ovládacích pinů lze docílit dvou stejně fungujících přepínačů jako TS5A3159 s rozdílem možnosti plného propouštění střídavých signálů. [16]

Druhý spínač bude využit k odpojení 16bitového převodníku LTC2411, který by sinusovým signálem mohl být také poškozen, a připojení k obvodu pro detekci amplitudy sinusového signálu.



Parametry obvodu PGA207 [17]

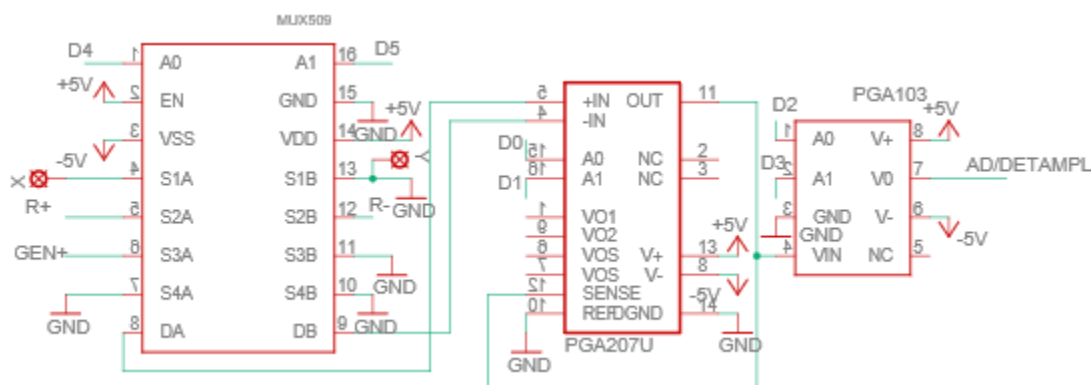
- Zisk 1, 2, 5, 10
- Volba zesílení dvěma bity
- napájecí napětí $\pm 4,5$ V až ± 18 V

Parametry obvodu PGA103 [18]

- Zisk 1, 10, 100
- Volba zesílení dvěma bity
- napájecí napětí $\pm 4,5$ V až ± 18 V

Vzhledem ke kombinaci takto do série zapojených zesilovačů, je možné docílit zesílení až 1000. Pro ovládání zesilovačů multiplexoru bylo vytvořeno rozhraní typu SPI z posuvného registru 74HC595 a čtyř hradel typu NAND obvodu 74HC00. Poslední 2 bity (bity D7 a D6) tohoto SPI rozhraní jsou využity pro ovládání přepínačů DG9426 a TS5A3159.

Výstup zesilovače je pomocí dvojice přepínačů obvodu DG9426 připojen buď na A/D převodník LTC2451, anebo na detektor amplitudy AC signálu tvořený schottkyho diodou a kondenzátorem.



Obr. 3-10 Schéma zapojení zesilovače

3.10 Výběr displeje

Displej je koncová část zobrazovací techniky pro interakci s uživatelem. Displej je využíván pro zobrazování grafické reprezentace stavů zařízení a údajů důležitých pro uživatele, v případě tohoto projektu informace o velikosti primární vlastnosti součástky a interakce s uživatelem pomocí menu.

Pro výběr displeje pro projekt jsou důležitá tato kritéria:

- Cena displeje
- Jednoduchá ovladatelnost
- Rozměry v poměru s užitečnou plochou pro zobrazování

Displej **OLED** je grafický displej dostupný v několika rozměrech a rozlišeních. Displej má integrované komunikační protokoly SPI nebo I²C. Nevýhodou displeje je vyšší cena a náročná metoda zobrazování znaků z programátorského hlediska. Výhodou je příjemnější projev displeje z pohledového a možnost zobrazování vlastních znaků různých rozměrů na přesně určených místech. Další výhodou je implementace komunikačních protokolů a tedy menší počet potřebných spojení k ovládání displeje. Vzhledem k náročnosti programování displeje nebyl použit v projektu.

Klasický **LCD** displej také disponuje širokou škálou velikostí a rozlišení. Běžnou variantou pro projekty podobného zaměření jako je tento bývá využíván displej s rozlišením 16x2 znaků a rozlišením znaku 8x5 pixelů. Displej je řízen mikrokontrolérem určeným k řízení obrazovky HD44780 firmy Hitachi, který je napájen přímo na modulu displeje.

Výhodou displeje je jeho jednoduchá ovladatelnost, nízká energetická spotřeba a integrovaná sada znaků ASCII pro zobrazení na displeji. Pro zobrazení znaku je tedy nutné „pouze“ určit pozici, kde je zapotřebí znak zobrazit a předat ASCII adresu znaku.

Nevýhodou displeje je omezená volnost při zobrazování znaků, jelikož displej má přímo definované pozice pro zobrazení znaků o specifické velikosti. Další nevýhodou je potřebný počet vývodů ovládacího mikrokontroléru pro uskutečnění zobrazení.

Displej je ovládán třemi ovládacími piny a několika datovými piny. Ovládací piny jsou

- Enable – slouží pro informování mikrokontroléru HD44780, že jsou data na datových pinech displeje připraveny ke čtení. Po přípravě dat je zapotřebí na pinu Enable vygenerovat pulz, jelikož HD44780 reaguje na náběžnou hranu na tomto vstupu.
- RS – Register Select – Slouží pro informování HD44780, zda data na vstupech datových pinů obsahují data pro zobrazení znaku nebo obsahují příkazovou instrukci

- R/W – Read/Write – Určuje, jestli jsou data do displeje zapisována nebo z něj čtena. V mnoha aplikacích nebývá čtení z displeje využito, a proto je v hodně případech tento pin připojen trvale na zem (0 V), čímž je permanentně zvolená možnost zápisu do displeje.

Datové piny nesou označení D0 – D7. Displej rozlišuje dva režimy zadávání dat. 8bitový režim a 4bitový režim. V 8bitovém režimu jsou využity všechny datové piny, tedy celou instrukci. Ve čtyřbitovém režimu se využívají pouze piny D4-D7. V tomto režimu se posílají první čtyři bity instrukce jako první následované spodními čtyřmi bity.

Minimální počet vývodů z displeje je tedy minimálně šest vývodů (4 datové a 2 ovládací). Počet vývodů je možné dále redukovat použitím I/O expandéru PCF8574 firmy Texas Instruments, který využívá protokol I²C, a je tak možné zredukovat počet vývodů až na dva. Vzhledem k možnosti redukce vývodů a jednoduchosti ovládání, byl displej zvolen pro účely práce. [22]

3.11 Výběr mikrokontroléru

Při výběru mikrokontroléru jsou důležitá následující kritéria

- Dostatečná paměť flash pro pojmnutí programu měřiče s dostatečnou rezervou pro budoucí updaty
- Dostatečná rychlost systémových hodin pro měření času a načasování operací
- Dostatečný počet ovladatelných vývodů potřebných pro řízení hardwarových prvků měřiče
- Podpora komunikačních protokolů využitých pro komunikaci se zvolenými součástkami pro měřič
- Integrace modulů, které jsou nutné pro měření součástek (AD převodník)
- Nižší cena
- Dostupnost a implementace vývojového prostředí
- Vzhledem zadání, čip společnosti ATMEL
- Nepříliš velká složitost nahrávání softwaru

Společnost ATMEL vyrábí široké množství mikrokontrolérů viz kapitola [2.4.1.2](#), a tak je z čeho vybírat. Pro účely projektu byl zvolen mikrokontrolér ATMEGA328P-PU z důvodu dostatečné paměti a z důvodu, že jsem s funkcionalitou mikrokontroléru obeznámen občasnou manipulací s vývojovými kity Arduino.

3.11.1 ATmega328P-PU

Jak již název vypovídá 8bitový čip ATmega328P-PU je členem rodiny ATMEL AVR megaAVR (viz kapitola [2.4.1.1](#)). Čip má 32 kB paměti flash, 2kB paměti SRAM (Static Random Access Memory) a 1kB programovatelné paměti EEPROM. 32kB paměti flash by mělo být dostatek pro pojmutí softwarové části měřiče. ATmega328P-PU má několik vnitřních časovačů a registrů, z nichž některé budou v aplikaci RLC měřiče využity. ATmega podporuje běžné komunikační protokoly, jako je SPI, USART či I²C. Mikrokontrolér se prodává ve vícero pouzdrech, pro aplikaci RLC měřiče bylo zvoleno pouzdro DIP28, pro rychlou výměnu čipu při poruše, či potřebě program debugovat. V tomto pouzdře má ATmega 28 vývodů, z toho 23 programovatelných.

ATmega328P-PU vyžaduje napájení 5 V a externí hodinový signál o frekvenci nanejvýš 20 MHz proporcionální k napájecímu napětí. Hodinový signál bude realizován externím krystalem HC47USSMD o frekvenci 16MHz, což je hodnota běžně užívaná ve spojení s mikrokontrolérem ATmega328P-PU. Pro A/D převodník integrovaný uvnitř mikrokontroléru je potřeba dodat referenční napětí 5 V. Cena čipu se pohybuje kolem 60 Kč. [19]

Tabulka 2 – Rozložení pinové konfigurace mikrokontroléru ATMEGA328P

Pin MCU	Název	Připojení
1	PC6 / RESET	Reset
2	PD0 / RX	MPX A0
3	PD1 / TX	MPX A1
4	PD2 / INT0	MPX A2
5	PD3 / INT1	NE555 OUT
6	PD4 / T0 / XCK	AD9833 CS
7	VCC	VCC
8	GND	GND
9	PB6 / XTAL1	Krystal
10	PB7 / XTAL2	Krystal
11	PD5 / T1	MPX OE
12	PD6	-
13	PD7	-
14	PB0 / ICP	NE555 OUT
15	PB1	-
16	PB2 / SS	SS SPI ADAPTER
17	PB3 / MOSI	MOSI
18	PB4 / MISO	MISO
19	PB5 / SCK	SCK

20	AVCC	VCC
21	AREF	REF
22	GND	GND
23	PC0 / ADC0	Tlačítka
24	PC1 / ADC1	Měření C
25	PC2 / ADC2	Měření L
26	PC3 / ADC3	-
27	PC4 / ADC4 / SDA	SDA
28	PC5 / ADC5 / SCL	SCL

3.12 Ovládací prvky

Vzhledem k zadání, je nutné implementovat prostředí pro interakci s uživatelem. Toho je docíleno přidání tří tlačítek pro ovládání módu a spouštění zařízení. V návrhu také musí být prvek zodpovědný za připojení a odpojení baterie, tedy tlačítko zapnutí a vypnutí. Pro účely projektu byla vybrána klasická tlačítka OMRON B3F-4000.

Tlačítko pro zapnutí a vypnutí je při stisku připojeno přes spojení zdrojové desky spojem BTN k zemi, čímž bude propojovat výstupní pin zdroje IP5108 se zemí.

Tlačítka pro ovládání zařízení jsou připojena k vstupnímu pinu mikrokontroléru přes odporový dělič napětí tak, aby byla připojena na jednom vstupu mikrokontroléru a dle úrovně změřené na vstupu se dalo jasně identifikovat zmáčknuté tlačítko. Odporů v děliči napětí mají každý hodnotu 1 k Ω .

3.13 Výběr baterie

V zadání práce je uvedeno, že zařízení musí být napájeno z akumulátoru.

Požadavky na baterii

- Nominální napětí dostatečné pro konverzi napětí na +5 V
- Dostatečná výdrž baterie
- Nižší cenová relace
- Dobrá spolehlivost
- Nižší rozměry baterie

Vzhledem k implementaci integrovaného obvodu IP5108 pro správu bateriových systému powerbank, byla zvolena Li-Ion baterie rozměru s nominálním napětím 3,63V, pro kterou byl obvod IP5108 primárně navržena. Konkrétní baterie je Sony VTC5 s kapacitou 2600 mAh. V budoucnu bych rád tuto baterii nahradil skladnějším typem baterie LiPo.

3.14 Zakončení návrhu

Po výběru všech důležitých součástek bylo sestrojeno finální schéma zapojení a zařízení bylo sestrojeno na několika panelech univerzálních pájivých polí. Tato podoba zařízení byla použita pro vývoj a ladění programu měřiče. Jelikož je bylo toto zařízení sestrojeno z několika desek, je rozměrově mnohem větší než by ve skutečnosti mohlo být.

Po ověření funkčnosti zařízení a proměření jednotlivých cest bylo finální schéma převedeno do digitální podoby softwarovým programem pro vývoj elektronických zařízení EAGLE od firmy Autodesk. Finální schéma RLC měřiče je dostupné v příloze [A](#).

Po sestrojení finálního schématu obvodu, bylo toto schéma převedeno do návrhu desky plošných spojů. Vhodným rozmístěním jednotlivých součástek na desce bylo docíleno minimálního křížení cest. Jelikož se jedná o můj první návrh desky plošných spojů, určitá část cest vodičů byla vytvořena za pomoci integrovaného nástroje autorouter, valná většina spojů však byla „routována“ manuálně.

Výsledná deska plošných spojů má rozměry 10x8 cm a obsahuje 63 propojení (via) z horní strany desky na spodní a naopak. Po důkladné kontrole všech cest a spojů nejen optické, ale i elektronické (DRC – Design Rule Check), byly zdrojové soubory gerber file (.gbr) desky odeslány na výrobu do čínské společnosti JuaLiChuang (JLCPCB.com). Výrobce desky byl vybrán na základě doporučení uživatelů na technických webech elektronického zaměření. Výsledná navržená deska RLC měřiče je dostupná v příloze [B](#).

4 SOFTWAREVÁ ČÁST RLC MĚŘIČE

Tato část práce je věnována samotné konfiguraci mikrokontroléru ATmega328P-PU bez které by měřič nefungoval. Vzhledem ke složitosti programování podobné aplikace v prostředí assembleru, kde je programování tvořeno přímým voláním instrukcí mikrokontroléru, bude mikrokontrolér programován pomocí vývojového prostředí Atmel Studio 7.0, který je založen na programovacím jazyku C (AVR C). Prostředí Atmel Studia v sobě má implementované veškeré základní nástroje, včetně knihoven pro práci s registry a programátoru „fuse“ bitů, potřebné pro programování mikrokontrolérů firmy Atmel (Microchip). V Atmel Studiu je také zabudován kompilér, který převede zdrojový kód do binárního souboru s instrukcemi, který lze nahrát přímo do mikrokontroléru.

4.1 Základní práce s registry mikrokontroléru Atmel

Přiřazování hodnot do registrů mikrokontrolérů patří k nejzákladnějším dovednostem pro práci s mikrokontroléry. V Atmel Studiu není zapotřebí řešit přímo adresy registrů, ale je možné využít knihovny *avr/io.h* s předdefinovanými konstantami, které na dané adresy odkazují.

Nastavení hodnoty bitu 1 do registru se provádí bitovou operací OR v jazyce C reprezentovanou rovným lomítkem |.

Nastavení hodnoty bitu 0 do registru se provádí bitovou operací AND a negováním pozice bitu, který má být nulován. Bitová operace AND je v jazyce C reprezentována symbolem and &.

Příklad nastavení výstupního pinu PB0, pro připojení na interní pull-up rezistor (viz kapitola [2.4.1.3](#)) [23]

```
DDRB |= ~(1<<PORTB0);  
PORTB |= (1<<PORTB0);
```

4.1.1 Vnitřní převodník mikrokontroléru ATMEGA328P

V balíčku mikrokontroléru je implementován vnitřní 10 bitový A/D převodník, který je řízený vnitřními registry k němu přidruženými.

Hlavními ovládacími registry AD převodníku jsou registry ADCSR (ADC Control and Status Register) A a B, které obsahují řídicí bity pro ovládání chování převodníku (spouštění, rychlost převodu atd.) a ADMUX (ADC Multiplexer Selection Register), jenž zajišťuje volbu referenčního napětí pro převodník a volbu kanálu pro převod (ze kterého

vstupu se bude zjišťovat hodnota). Posledním důležitým registrem je registr 16 bitový registr ADC, který se skládá z dvou 8bitových registrů ADCL a ADCH. V tomto registru je uložena hodnota na vstupu AD převodníku v digitální podobě po vykonání převodu.

První převod po zapnutí AD převodníku trvá 25 hodinových cyklů a kterýkoliv další převod trvá 13 hodinových cyklů. Výsledek převodu je uložen do registru ADC, kde je uložen do konce dalšího převodu, kdy je přepsán novým výsledkem. Výsledek převodu je popsán rovnicí

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} \quad [-] (4.1)$$

kde:

- V_{IN} napětí na vstupu převodníku [V]
- V_{REF} referenční napětí [V]
- ADC.....výstupní hodnota převodníku [-],

Četnost převodů za sekundu lze nastavit dělením základního hodinového signálu tzv. předděličkou (prescaler), která propouští každý n-tý pulz hodinového signálu v závislosti na nastavení. Dle datasheetu mikrokontroléru ATMEGA328P^[4] je ideální frekvence hodinového signálu pro úspěšný převod všech 10 bitů mezi 50kHz – 200 kHz. Rychlost převodu lze měnit bity ADPS0-ADPS2 v registru ADCSRB (viz tabulka 23-5. v datasheetu mikrokontroléru)^[4].

Měření AD převodníku je zahájeno v momentě zapsání hodnoty 1 na bity ADEN a ADSC v registru ADCSRA.

Volba vstupu, na kterém bude převod uskutečněn, je určena kombinací bitů MUX0-MUX3 v registru ADMUX. V registru ADMUX se také určuje vstup referenčního napětí pro převodník bity REFS0 a REFS1. [19]

4.1.2 Vnitřní časovače mikrokontroléru ATMEGA328P

Pro operace vyžadující přesné načasování nebo pro měření doby uplynulé od dané události se využívají vnitřní časovače mikrokontroléru. Časovače v mikrokontroléru ATMEGA328P jsou 4. Tři časovače slouží k obecnému využití a jsou označeny Timer/Counter 0, 1 a 2.

Čtvrtý časovač se nazývá Watchdog Timer (WDT) a je využit pro vnitřní detekci zacyklení. Mikrokontrolér pravidelně podává WDT informace o chodu systému. Pokud

dojde k zacyklení programu (WDT nepřijímá informace), WDT systém resetuje, aby zamezil případnému poškození systému a uvedl jej do standardního režimu.

Časovače Timer/Counter x (x reprezentuje číslo časovače 0-2) jsou přivedeny na hodinový signál mikrokontroléru a při každém pulzu zvyšují svoji hodnotu o 1. Dojde-li k přetečení časovače je o tomto mikrokontrolér informován nastavením příznakového bitu o přetečení v registrech TIFRx.

Mikrokontrolér ATMEGA328p má dva 8bitové časovače (Timer/Counter 0 a 2) s maximální hodnotou $2^8 = 256$ a jeden 16 bitový (Timer/Counter 1) s maximální hodnotou $2^{16} = 65536$.

Hlavními registry pro práci s časovači jsou registry TCCR_x (Timer/Counter Control Register) A a B, které definují mód a rychlost přičítání časovačů. Každý z časovačů může být nastaven do různých módů, například spravování PWM signálu, či porovnávání hodnot časovače s předdefinovanou hodnotou uživatelem. Hodnota časovačů je uložena v registrech TCNT_x pro 8 bitové časovače, pro 16 bitový časovač v registrech TCNT1H a TCNT1L. [19]

Pro přesnější časování událostí jsou k časovačům běžně přidruženy registry OCCRx A a B, do kterých může uživatel uložit žádanou hodnotu. Časovač při správném nastavení během počítání průběžně kontroluje, zda se jeho hodnota nerovná hodnotě uložené v těchto registrech. Pokud se hodnoty rovnají, může být tato skutečnost využita pro tzv. přerušení.

Stejně jako u AD převodníku, i u časovačů lze nastavit rychlost počítání hodnot předděličkou. Nastavení předděličky se realizuje v registru TCCR_xB bity CS00-CS02. V základním nastavení je hodnota předděličky nastavena na 0, což znamená, že časovač neběží. Pro aktivaci časovače je zapotřebí nastavit bity CS00-CS02 na nenulovou hodnotu. Z celkového hodinového signálu mikrokontroléru a hodnoty předděličky lze vypočítat reálný uběhnutý čas od spuštění časovače z rovnice

$$t = \frac{n \cdot PRESC}{F_{CPU}} \quad [s](4.2)$$

kde:

- n hodnota čítacích registrů časovače [—]
- PRESC...nastavení předděličky [—]
- F_{CPU}rychlost systémového hodinového signálu [Hz],

4.1.3 Obsluha přerušení

Obsluha přerušení je část kódu vykonávaná v reakci na specifickou událost v systému, která je schopna vyvolat přerušení (viz kapitola [2.4.1.4](#)).

Většina modulů mikrokontroléru ATMEGA328P je schopna vyvolávat přerušení. Některé moduly mají definovaný pouze jeden vektor přerušení (např, AD převodník) a některé více (Timer/Counter0), které spouštějí blok kódu na základě žádosti o přerušení. Seznam vektorů přerušení k nalezení v datasheetu mikrokontroléru ATMEGA328P^[4]. Pro povolení přerušení je potřeba povolit přerušení jak v interních registrech modulů, které mají přerušení spouštět (například u AD převodníku bit ADIE – ADC Interrupt Enable v registru ADCSRA), tak je také nutné povolit globální bit přerušení I (Global Interrupt Enable) lokalizovaný ve statusovém registru mikrokontroléru SREG (AVR Status Register). V Atmel Studiu se pro povolení globálního bitu přerušení využívá knihovny *avr/interrupt.h* a její funkce *sei()*. Zápis obsluhy přerušení v jazyce C se provádí pod hlavním kódovým blokem *main.c* funkcí ISR, kde je jako argument vložen vektor přerušení. Tělo funkce tvoří instrukce pro procesor. [21]

```
TIMSK0 |= (1<<TOIE0);
```

```
ISR(TIMER0_OVF_vect)
{
    PORTB ^= (1<<PORTB0);
}
```

Ukázka kódu pro obsluhu přerušení při přetečení časovače 0

4.2 Struktura programu RLC měřiče

Program je rozdělen do několika knihoven pro zpřehlednění celkového programového kódu. Knihovny lze pomyslně rozdělit na knihovny

- Komunikační – knihovny, které se starají o komunikaci mezi jednotlivými prvky RLC měřiče (TWI, SPI...)
- Podpůrné – knihovny starající se o implementaci často opakovaných kódových bloků (zobrazování hodnot na lcd displeji apod.)
- Ovládací – knihovny, které ovládají celkový běh programu (měření součástek, obsluha uživatelského rozhraní)

Hlavním ovládacím prvkem je knihovna ovladače (*controller*). Knihovna se stará o prvotní nastavení měřiče při spuštění tj. inicializuje jednotlivé moduly, nastavuje vstupní a výstupní piny apod. a také o interakci mezi programem a uživatelem. Knihovna

vyhodnocuje data z vnitřního AD převodníku, který je připojený na tlačítka a na základě jejich vyhodnocení volá funkce pro měření součástky nebo nastavení měřicího módu měřiče. Knihovna také rozhoduje, co a jak bude v daný moment zobrazeno na displeji měřiče.

Hlavní knihovnou pro měření součástek je knihovna měření (*measurements*). Knihovna obsahuje metody pro rozpoznávání a měření součástek připojených k měřiči, stejně jako funkce k tomuto účelu využité.

Pro ovládání hardware prvků je využita knihovna příkazů (*commands*). Knihovna se stará o nastavování hardware prvků, přepínání elektronický přepínačů a nastavování frekvence generátoru AD9833. Knihovna ovládá zesilovač a multiplexory připojené ke měřené součástce.

4.3 Interakce zařízení s uživatelem

Zařízení obsahuje 3 tlačítka pro interakci s uživatelem, která jsou přes odporový dělič připojeny ke vstupu ADC0 mikrokontroléru (viz kapitola [3.10](#)). K měření vstupu z tohoto děliče je využit tzv. free-running-mode, což znamená, že ihned po doměření prvního vzorku převodníku je spuštěno měření další nezávisle na časování a inputu uživatele.

Přerušení, které je způsobeno úspěšným převodem napětí na vstupu ADC0 do digitální podoby, spouští funkci *ADC_conv_complete* umístěnou v knihovně controller, která na základě velikosti změřeného napětí a právě běžícího módu měřiče rozhoduje o prováděné akci. Při měření součástky jsou tlačítka nefunkční, aby nedocházelo k interferenci s měřením.

Měřič rozlišuje čtyři režimy (módy) stavů, dle kterých se tlačítka a další moduly chovají

- Základní režim
- Režim menu
- Režim měření
- Režim dokončení měření

4.3.1 Tlačítko potvrzení

Tlačítko potvrzení má tři funkce v závislosti na aktuálně běžícím módu měřiče. V běžném provozu jsou softwarově rozlišeny dva možné stavy.

Stav krátkého stisknutí, kdy uživatel nedrží tlačítko déle než 500 ms. V takovém případě v závislosti na módu měřiče buď spouští měření součástky (základní mód nebo mód dokončení měření), popřípadě potvrzuje hodnotu menu zvolenou uživatelem (mód menu).

Stav dlouhého stisknutí je možné využít pouze v základním módu a módu dokončení měření. V případě, že je tlačítko stisknuté více než 500 ms, vstoupí měřič do výběrového menu pro výběr měřeného druhu součástky (mód menu).

4.3.1.1 Rozhodnutí o dlouhém a krátkém stisku

Rozhodování je řešeno jednoduchým softwarovým algoritmem. Při první detekci stisku tlačítka potvrzení je zastaven free-running-mód AD převodníku a je nastaven mód jednoho vyžádaného převodu. Po uplynutí doby 500 ms je z převodníku vyžádán jeden převod a hodnota je porovnána s hodnotou předchozí. Pokud je hodnota převodu rovna stisku tlačítka potvrzení, je vykonán kus kódu pro dlouhý stisk (funkce *buttonConfirmLong*), pokud je rovná jiné hodnotě je vykonána část kódu pro krátký stisk (funkce *buttonConfirmShort*).

```
if (ADC > 610 && ADC <= 732){  
    ADCSRA &= ~_BV(ADIE);  
    _delay_ms(500);  
    int adc_second_read = ADCsingleREAD();  
    if (adc_second_read > 610 && adc_second_read <= 732){  
        buttonConfirmLong();  
    }  
    else {  
        buttonConfirmShort();  
    }  
    ADCSRA |= _BV(ADIE);  
    _delay_ms(500);  
}
```

Ukázka kódu pro obsluhu vyhodnocení délky stisku tlačítka potvrzení

Kde konstanty 610 a 732 v blocích logického rozhodování *if* jsou hraniční hodnoty, které měří AD převodník při stisku tlačítka potvrzení.

4.3.2 Tlačítka navigace up a down

Tyto tlačítka slouží pro navigaci v menu pro výběr měřené součástky uživatelem. Tlačítka jsou aktivní pouze v režimu menu a nijak neovlivňují chování měřiče v jiných módech. Mají na starost pohyb kurzoru při výběru upravováním jeho hodnoty a předávání proměnné kurzoru funkci pro tisk menu na LCD obrazovce.

4.3.3 Grafické rozhraní měřiče

Grafické rozhraní měřiče je zobrazováno na LCD display v závislosti na zvoleném módu. V každém režimu je v pravém horním rohu displeje zobrazena zkratka aktuálního měřicího módu měřiče (A – Auto, R – Rezistor, C – kondenzátor a L – cívka). V základním režimu je zobrazena indikace připravenosti zařízení pro měření, stejně jako stav baterie.

V režimu menu, je zobrazena vizuální reprezentace měřících režimů názvy měřených součástek. Součástí menu je ukazatel aktuální pozice kurzoru.

V režimu měření je zobrazena informace o tom, že měřič právě součástku proměřuje a také o jakou součástku jde.

V režimu dokončení měření je zobrazena změřená hodnota primární vlastnosti součástky s jednotkou. U odporů a kondenzátorů je součástí zobrazení výsledné hodnoty i nejbližší hodnota z hodnotové řady E12.

Obrázky grafického rozhraní jsou dostupné v příloze [D](#) dokumentu.

4.4 Autonomita

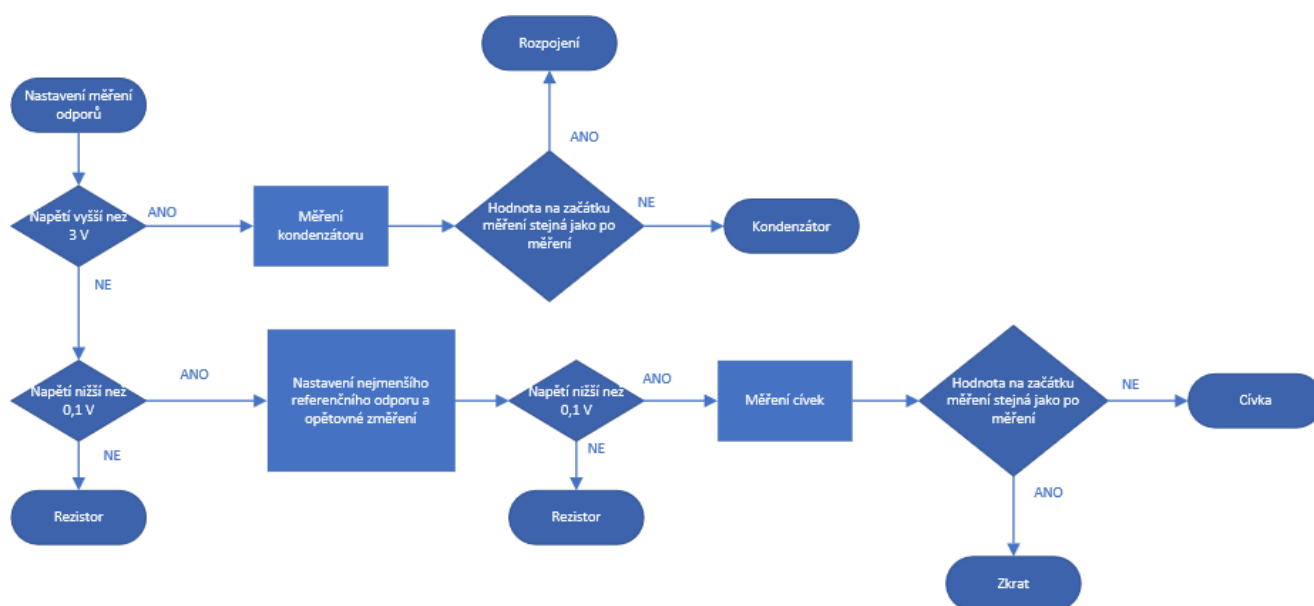
Jelikož RLC měřič musí být autonomní, je nutné vytvořit algoritmus, který dokáže rozeznat, jakou součástku uživatel připojil, jaká výstupní hodnota se od něj očekává a následně součástku změřit.

Algoritmus jako takový musí být schopen rozeznat i případy, kdy daná součástka bude špatně připojená, tedy musí rozeznat i zkrat a rozpojení. Tuto funkci zastává metoda *detectComponent*.

V první fázi je připojen okruh pro měření odporů a je změřeno napětí na součástce externí 16 bitovým AD převodníkem při nejvyšším referenčním odporu. Je-li napětí vyšší než 3,3 V, je připojen okruh pro měření kondenzátorů. V případě, že se opravdu jedná o kondenzátor je součástka na malý okamžik přivedena k zemi, pro případné vybití kondenzátoru. Následně je spuštěno měření kondenzátorů a je porovnáván počáteční stav napětí se stavem koncovým po jedné sekundě. Liší-li se napětí jen drobně je vyhodnoceno, že se nejedná o kondenzátor a metoda vrací předdefinovanou hodnotu `_NOT_CONNECTED_`, což značí, že uživatel pravděpodobně žádnou součástku nepřipojil. V opačném případě, kdy se hodnoty na začátku i konci velmi liší, je prvek vyhodnocen jako kondenzátor a je navržena hodnota `_CAPACITOR_` pro další práci.

Je-li napětí menší než 0,1 V, je nejprve vyzkoušen nejnižší referenční odpor. Pokud je nově změřené napětí vyšší než 0,1 V, s největší pravděpodobností se jedná o odpor a je vrácena hodnota `_RESISTOR_` pro další práci s ní. Pokud je napětí stále menší než 0,1 V, je odvod přepojen na měření cívek a vpuštěna frekvence o kmitočtu 50 kHz. V případě zvýšení napětí na prvku se pravděpodobně jedná o cívku a z metody je navracena hodnota `_COIL_` pro indikaci připojené cívky. Nemění-li se hodnota a zůstává pod hladinou 0,1 V, jedná se pravděpodobně o zkrat a je navracena hodnota `_SHORT_` indikující tento stav.

Pokud je prvotně změřená hodnota napětí mezi hodnotami 3,3 V a 0,1 V jedná se s největší pravděpodobností o odpor a tato hodnota je vrácena metodou.



Obr. 4-1 Jednoduchý diagram algoritmu zjišťování měřené součástky

Další zpracování softwarového řešení bude tématem této práce v druhé polovině semestru.

4.5 Algoritmus měření odporů

Měření odporů probíhá zavoláním metoda *measureResistance*. Na začátku funkce jsou hardwarové prvky nastaveny do konfigurace pro měření odporů a je zastaven free-running-mód vnitřního AD převodníku. Před zahájením měření je rozsah odporů (hodnota referenčního rezistoru) nastaven na nejvyšší.

Prvním krokem měření je zjištění ideálního rozsahu měření. Odpor je ve smyčce měřen a na základě vyčteného napětí se nastavený rozsah snižuje. Pokud je změřené napětí

nižší než 1,5 V, je zvolen nižší rozsah měření. Přesáhne-li změřená hodnota 3,3 V, je rozsah vrácen na předchozí vyšší rozsah a smyčka je ukončena.

V druhém kroku je voleno ideální zesílení zesilovače pro optimalizaci měřeného napětí zhruba v polovině rozsahu AD převodníku. Princip je stejný jako u předchozí smyčky pro volbu rozsahu.

Po nastavení rozsahu a zesílení je odpor několikrát změřen a po zohlednění spínacích odporů přepínačů vypočítán rovnicí

$$R = \frac{U_R \cdot R_{REF}}{U_C - U_R} \quad [\Omega] \quad (4.3)$$

kde:

- R měřený odpor [Ω]
- U_R ...napětí na měřeném odporu [V]
- R_{REF}velikost referenčního odporu odporové sítě [Ω]
- U_C velikost napěťové reference $U_C = 4,096$ V [V]

```
for(int i = 7; i >= 0; i--){
    voltage = readVoltage();
    if (voltage > top_threshold) {
        if (MPX != 7) MPX++;
        break;
    }
    else if (voltage <= top_threshold && voltage >= bottom_threshold)
        break;
    else {
        if (MPX != 0) MPX--;
    }
    setTopMPX(MPX);
    _delay_ms(20);
}
```

Ukázka kódu pro výběr referenčního odporu pro měření odporů

4.1 Algoritmus měření kondenzátorů

Pro měření kondenzátorů je volána metoda *measureCapacitance*. Měření kondenzátoru probíhá v aktuální verzi metodou nabíjení přes známý odpor z odporové sítě.

Na začátku měření je hardwarová část uvedena do stavu pro měření kondenzátorů a je nastaven vnitřní AD převodník. Před měřením je také vynulován časovač 1 (Timer/Counter 1). Nastavení AD převodníku

- Nastavení předděličky pro rychlý běh
- Nastavení vstupního multiplexu na vývod ADC1

- Nastavení vstupního pinu ADC1 jako výstup a připojení na zem pro vybití kondenzátoru

Těsně před měřením je pin ADC1 nastaven jako vstupní, čímž umožní kondenzátoru se nabíjet, a je spuštěn časovač 1. Princip měření kondenzátoru probíhá ve smyčce, kdy je postupně monitorován stav nabití kondenzátoru. Dojde-li k přetečení časovače, je vynulován a je zvýšena hodnota počtu přetečení. Po dosažení nabití kondenzátoru na 63% je smyčka přerušena a časovač je ihned zastaven. Pokud by došlo k problému při měření (například odpojením kondenzátoru uživatelem během měření) je ve smyčce implementován pěti sekundový timeout. Po změření kondenzátoru je jeho hodnota spočítána pomocí rovnice [2.6](#).

```
TCCR1B = 0x01;
DDRC &= ~_BV(PORTC1);
while(ADC < measuring_threshold){
    if((TIFR1 &(1<<TOV1)) == 1){
        TIFR1 |= (1<<TOV1);
        T1_OVF++;
    }
    //Time out after 5 seconds
    if(T1_OVF > 1220) break;
}
```

Ukázka kódu smyčky měření kondenzátorů

Na začátku měření je kondenzátor zběžně proměřen na referenčním odporu 3,7 k Ω a vypočítána hodnota jeho přibližné kapacity. Na základě hodnoty po výpočtu je zvolen vhodný rozsah pro měření a kondenzátor je změřen na tomto rozsahu.

4.2 Algoritmus měření cívek

Pro měření cívek je volána metoda *measureInductance*.

Na začátku měření je opět nastavena hardwarová část na měření cívek a generátor je nastaven na sinusový signál o frekvenci 5 kHz. Vstup AD převodníku je přepnut na pin ADC2. Postupně je proměřena přepínáním spodního multiplexu na vstupu zesilovače MUX509 maximální amplituda měřené indukčnosti, maximální amplituda odporu v sérii s cívkou a celková hodnota sériového obvodu LC. Mezi měřeními je vstupní pin ADC2 podobně jako v případě měření kondenzátorů připojován k zemi pro vybití kondenzátoru v detektoru amplitudy. Frekvence generátoru je měněna na základě velikosti měřených napětí. Ze tří změřených hodnot při optimálním nastavení je na konci měření pomocí rovnice [3.6](#) vypočtena celková indukčnost připojené cívky.

Při měření každého vstupu je vhodně voleno zesílení zesilovače pro co nejlepší limitace úbytku napětí na schottkyho diodě v detektoru amplitudy a dosažení lepší pozice v křivce převodu AD převodníku. Tabulka úbytků na diodě dostupná v příloze E. Každý vstup je proměřen 10krát a v 10 ms intervalech a nejvyšší hodnota měření je vybrána jako výstupní.

```
uint16_t ADC_array[10];
for(int i = 0; i < 10; i++){
    ADC_array[i] = ADC;
    _delay_ms(10);
}
uint16_t ADC_comp = 0;
for(int k = 0; k<10; k++){
    if (ADC_array[k] > ADC_comp) ADC_comp = ADC_array[k];
}
```

Ukázka kódu smyčky měření hodnot ze zesilovače při měření cívek

4.3 Nahrání programu do mikrokontroléru

Pro nahrání programu do mikrokontroléru byl vybrán ATMEL-ICE programátor firmy Microchip, který programuje mikrokontrolér přes rozhraní ISP (In-System Programming). Programátor je určen pro programování všech mikrokontrolérů firem ATMEL a Microchip. [24]

5 ZÁVĚR

Tématem bakalářské práce bylo navrhnout, sestrojít a naprogramovat zařízení schopné rozeznat připojenou součástku a následně změřit její primární vlastnost. Zařízení mělo být jednosvorkové a napájené z akumulátoru.

Při návrhu bylo nutné se seznámit s teorií měření součástek a následně vybrat metody pro měření s výstupovými hodnotami vhodnými pro převod do digitální podoby. V rámci návrhu bylo vyzkoušeno několik metod, z nichž některé byly příliš složité pro povahu projektu. Některé metody byly odzkoušeny s použitím osciloskopu Hantek 1008c a multimetru KT-305A. Metody ve většině případů fungovaly správně mimo digitální prostředí, ale při připojení na mikrokontrolér se je nepodařilo realizovat z důvodu špatného programování mikrokontroléru nebo vnějších vlivů (metoda měření kondenzátorů s využitím integrovaného obvodu NE555).

Největší práci mi zabralo vybírání metody pro měření cívek, kde jsem se snažil vyhnout přílišné složitosti metody. U některých metod pro měření cívek byl obvod funkční, což bylo ověřeno osciloskopem. Po připojení těchto obvodů do jednosvorkového zapojení, tedy při vlivu spínacího odporu přepínačů, metody nefungovaly správně a muselo od nich být upuštěno.

Pro měření součástek byly vybrány tyto metody:

- Pro měření odporů metoda děliče napětí
- Pro měření kondenzátoru metoda nabíjení přes známý odpor R
- Pro měření cívek zapojení sériového obvodu RL

Při výběru součástek bylo možné volit dva druhy pouzder. Pouzdra DIP nebo pouzdra SMD. Z důvodu širšího spektra výběru součástek bylo pouzdro SMD zvoleno jako primární a u obvodů, které se vyrábějí v obou pouzdrech, byly upřednostňovány. Pokud jde o výběr samotných integrovaných obvodů, byly upřednostňovány součástky od známých výrobců (Texas Instruments, Vishay, Microchip), kde byla zohledněna cena a dostupnost zvoleného obvodu.

Po sestrojení a naprogramování bylo zařízení odzkoušeno pro měření součástek a softwarově kalibrováno se zohledněním nepřesnosti součástek a spínacích odporů. Zařízení je schopné změřit primární vlastnosti součástky a na LCD displeji tuto hodnotu uživateli zobrazit. Přesnost měření je závislá na dané součástce. U odporů a kondenzátorů se měřené hodnoty velice blíží hodnotám uvedeným výrobcem. U měření cívek se změřené hodnoty liší v závislosti na velikosti cívky. Vzhledem k povaze projektu, kdy má jít o příruční

měřič, který má uživatele informovat o přibližné hodnotě, tento výsledek považuji za dostatečný.

Díky bakalářské práci jsem se naučil o problematice vývoje hardwaru i softwaru elektronických zařízení a základních stavebních součástkách obvodů. Zjistil jsem, že sestavit takové zařízení není jednoduchá záležitost a skrývá v sobě mnoho práce, ať už jde o výběr součástek, návrh desky plošných spojů nebo debutování softwarové části.

Návrhy na zlepšení dosavadního RLC měřiče

- Vyvedení výstupu generátoru AD9833 mimo desku a umožnit uživateli zařízení využít jako programovatelný zdroj signálů ovládaný softwarem zařízení.
- Zrušení uzemněných pinů multiplexu MUX509 a jejich vyvedení mimo zařízení. Tyto piny by mohly být využity pro externí měření napětí v jiných obvodech, tedy zařízení by fungovalo jako voltmetr.

LITERATURA

- [1] Elektrotechnická měření. Praha: BEN-technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
- [2] Kolektiv autorů. Skripta pro předmět Měření v elektrotechnice. Brno 2016
- [3] Portál [wikipedia.org](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kirchhoffovy_z%C3%A1kony), *Kirchhoffovy zákony* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kirchhoffovy_z%C3%A1kony
- [4] Portál [electronics-tutorials.ws](https://www.electronics-tutorials.ws/), *RC Charging circuit* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html
- [5] Portál [wikipedia.org](https://cs.wikipedia.org/wiki/NE555), *NE555* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/NE555>
- [6] Portál [wikipedia.org](https://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance#Metoda_t%C5%99%C3%AD_voltmetr%C5%AF), *Metoda tří voltmetrů* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance#Metoda_t%C5%99%C3%AD_voltmetr%C5%AF
- [7] Portál [meettechniek.info](https://meettechniek.info/passive/inductance.html), *Measuring self-inductance & ESR* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://meettechniek.info/passive/inductance.html>
- [8] Portál [danyk.cz](http://danyk.cz/lmetr.html), *Měřič indukčností* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z <http://danyk.cz/lmetr.html>
- [9] Portál [injoinic.com](http://www.datasheet-pdf.com/PDF/IP5108-Datasheet-Injoinic-1139140), *IP5108 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/IP5108-Datasheet-Injoinic-1139140>
- [10] Portál [maximintegrated.com](https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX764-MAX766.pdf), *MAX764-MAX766 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX764-MAX766.pdf>
- [11] Portál [analog.com](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2451fg.pdf), *LTC2451 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2451fg.pdf>
- [12] Portál [microchip.com](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005474E.pdf), *MCP1501 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005474E.pdf>
- [13] Portál [nexperia.com](https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/CBT3251.pdf), *CBT3251 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/CBT3251.pdf>
- [14] Portál [analog.com](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9833.pdf), *AD9833 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9833.pdf>
- [15] Portál [ti.com](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ts5a3159.pdf?ts=1591451238329), *TS5A3159 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ts5a3159.pdf?ts=1591451238329>
- [16] Portál [vishay.com](https://www.vishay.com/docs/75770/dg9424e.pdf), *DG9424E, DG9425E, DG9426E datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/75770/dg9424e.pdf>

- [17] Portál [ti.com](https://www.ti.com), *PGA207, PGA206 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/sbos033/sbos033.pdf?ts=1591545977107>
- [18] Portál [ti.com](https://www.ti.com), *PGA103 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga103.pdf?ts=1591546046975>
- [19] Portál [microchip.com](http://ww1.microchip.com), *ATmega328P datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [20] Portál eater.net, *Build an 8-bit computer from scratch* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://eater.net/8bit>
- [21] Portál [wikipedia.org](https://cs.wikipedia.org), *Přerušení* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99eru%C5%A1en%C3%AD>
- [22] Portál [hitachi.eu](https://www.sparkfun.com), *HD44780 datasheet* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>
- [23] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. Mikroprocesorová technika: [práce s mikrokontroléry řady ATMEL AVR ATXmega A4]. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-406-4.
- [24] Portál [microchip.com](http://ww1.microchip.com), *Atmel ICE User Guide* [online]. [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-ICE_UserGuide.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně
DC	...	Direct Current – Stejnoseměrný proud
AC	...	Alternating Current – Střídavý proud
ESR	...	Equivalent Series Resistance - Ekvivalentní sériový odpor
MCU	...	Microcontroller Unit – Mikroprocesorová jednotka
IC	...	Integrated circuit – Integrovaný obvod
A/D	...	Analog to Digital Converter – Převodník analog-digitál
I ² C	...	Inter-Integrated Circuit – Přenosové rozhraní
SDA	...	Serial Data Line - Datová linka rozhraní I ² C
SCL	...	Serial Clock Line – Časová linka rozhraní I ² C
SRAM	...	Static Random Access Memory – Statická paměť
EEPROM	...	Electrically Erasable Program Read-Only Memory – Elektronicky vymazatelná programová paměť.
DIP	...	Dual In-Line Packaging – Styl balení integrovaných obvodů
I/O	...	Input / Output – Vstup nebo výstup z mikrokontroléru
SMD / SMT	...	Surface Mount Device / Surface Mount Technology - Styl balení integrovaných obvodů pro povrchovou montáž
DDR	...	Data Direction Register – Registr směru dat

Symbols:

U	...	napětí	[V]
I	...	proud	[A]
R	...	odpor	[Ω]
C	...	kapacita	[F]
L	...	indukčnost	[H]
f	...	frekvence	[Hz]
T	...	perioda	[s]
Z	...	impedance	[Ω]
τ	...	časová konstanta	[s]
	...	bitová operace OR	

& ... bitová operace AND

<< ... bitový posun vlevo

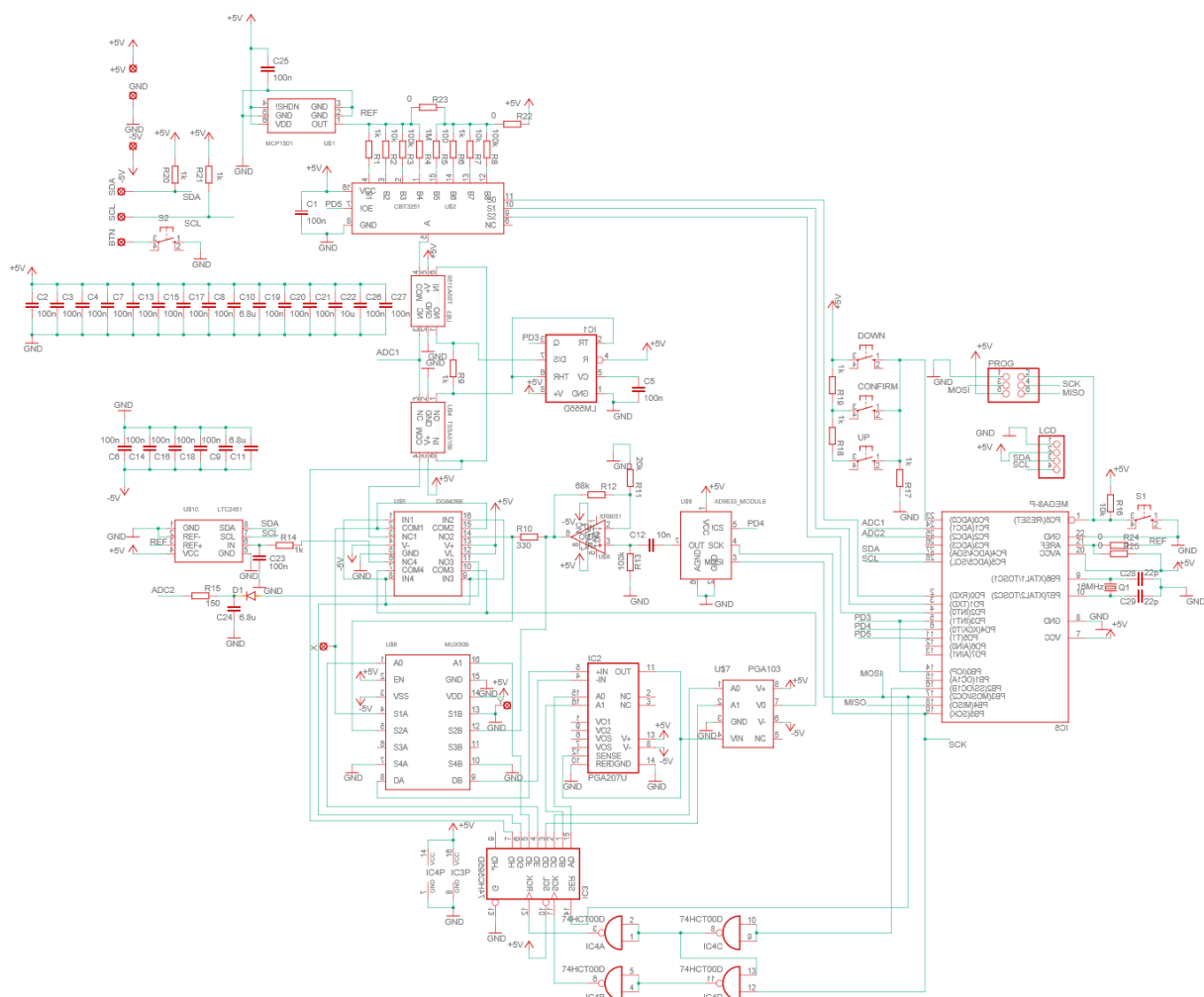
>> ... bitový posun vpravo

SEZNAM PŘÍLOH

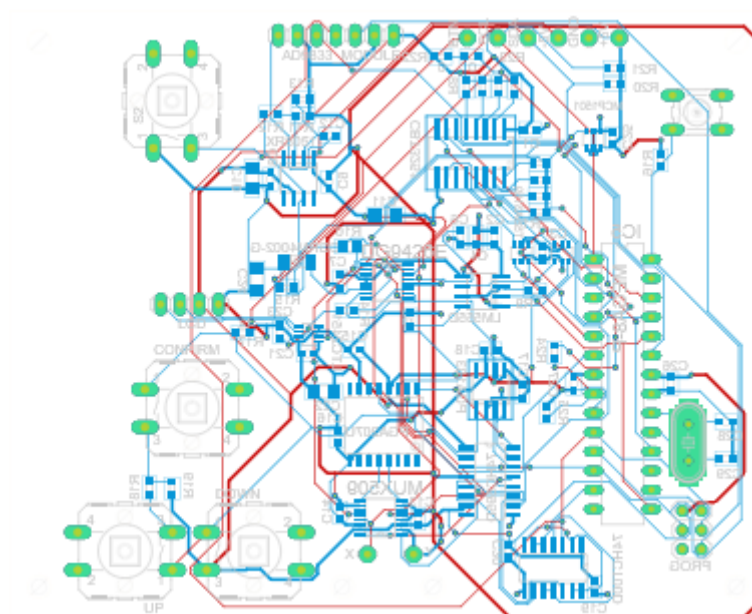
A. Schéma zapojení RLC měřiče	60
B. Návrh desky plošných spojů RLC měřiče	61
C. Prototyp RLC měřiče	62
D. Grafické rozhraní RLC měřiče	63
E. Desky plošných spojů.....	64
F. Tabulka úbytků napětí na schottkyho diodě v detektoru amplitudy	65
G. Obsah přiloženého multimédia.....	67

PŘÍLOHA

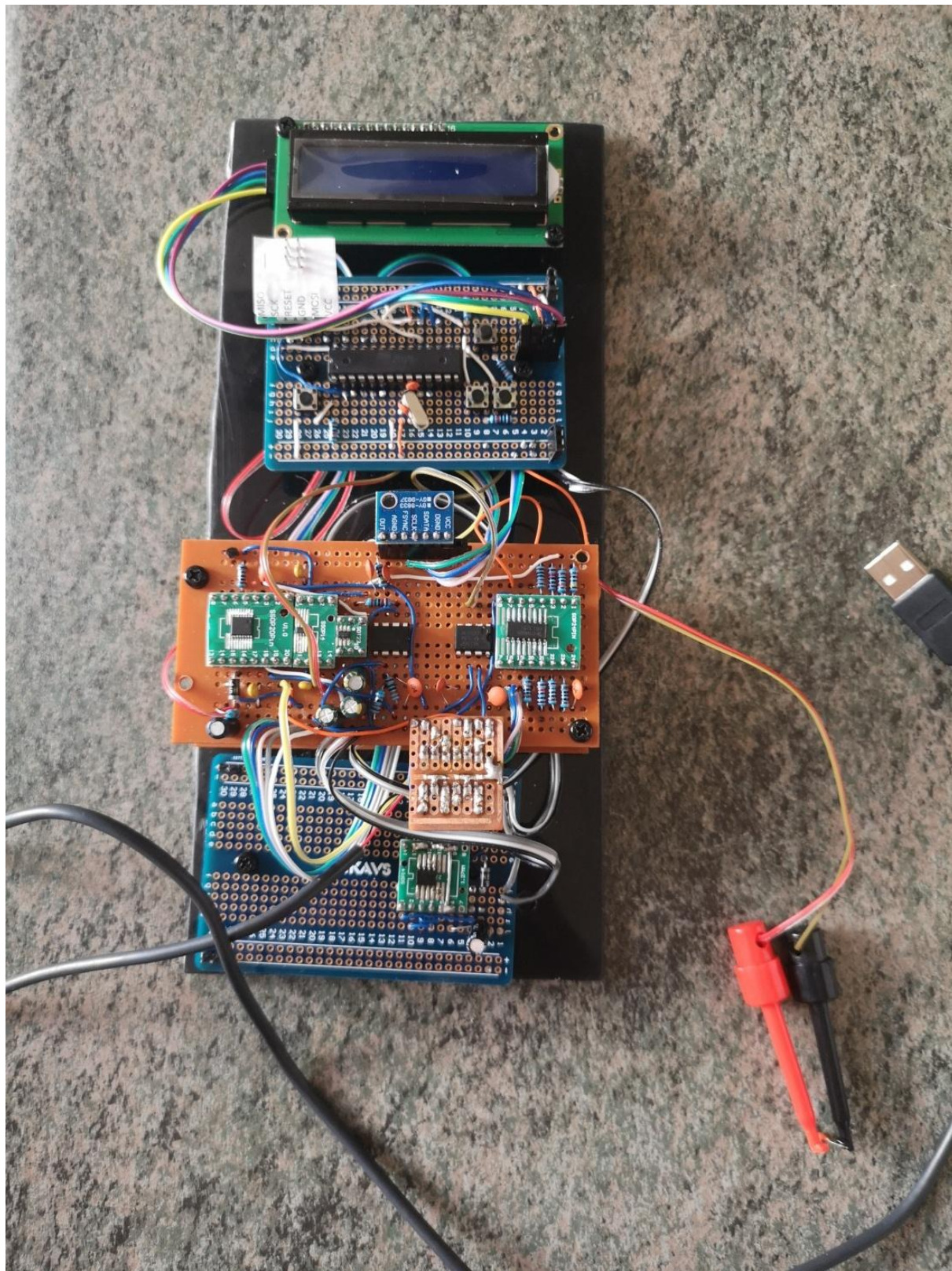
A. SCHÉMA ZAPOJENÍ RLC MĚŘIČE



B. NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ RLC MĚŘIČE



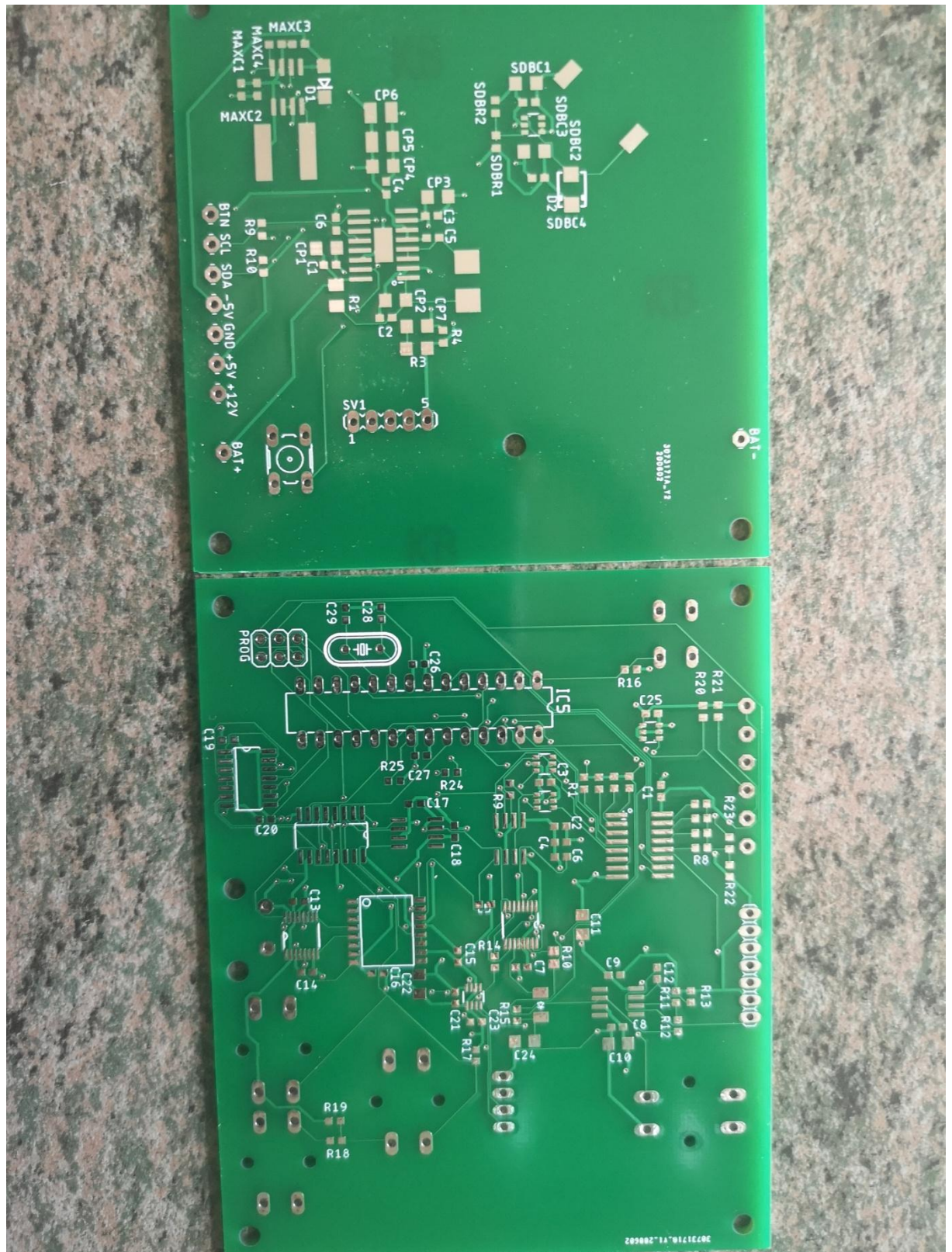
C. PROTOTYP RLC MĚŘIČE



D. GRAFICKÉ ROZHRANÍ RLC MĚŘIČE



E. DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



F.TABULKA ÚBYTKŮ NAPĚTÍ NA SCHOTTKYHO DIODĚ V DETEKTORU AMPLITUDY

Napětí generátoru [V]	Frekvence = 1 kHz		Frekvence = 10 kHz		Frekvence=50 kHz	
	Napětí na C [V]	Úbytek na D [V]	Napětí na C [V]	Úbytek na D [V]	Napětí na C [V]	Úbytek na D [V]
0,250	0,190	0,060	0,193	0,057	0,187	0,063
0,375	0,291	0,084	0,290	0,085	0,281	0,094
0,500	0,406	0,094	0,403	0,097	0,397	0,103
0,625	0,530	0,095	0,528	0,097	0,514	0,111
0,750	0,645	0,105	0,648	0,102	0,630	0,120
0,875	0,769	0,106	0,770	0,105	0,750	0,125
1,000	0,887	0,113	0,890	0,110	0,868	0,132
1,125	1,014	0,111	1,015	0,110	0,990	0,135
1,250	1,137	0,113	1,137	0,113	1,109	0,141
1,375	1,262	0,113	1,261	0,114	1,231	0,144
1,500	1,383	0,117	1,385	0,115	1,353	0,147
1,625	1,510	0,115	1,508	0,117	1,473	0,152
1,750	1,635	0,115	1,633	0,117	1,596	0,154
1,875	1,760	0,115	1,757	0,118	1,717	0,158
2,000	1,886	0,114	1,882	0,118	1,840	0,160
2,125	2,030	0,095	2,014	0,111	1,968	0,157
2,250	2,129	0,121	2,140	0,110	2,092	0,158
2,375	2,256	0,119	2,265	0,110	2,218	0,157
2,500	2,390	0,110	2,383	0,117	2,352	0,148
2,625	2,470	0,155	2,463	0,162	2,410	0,215
2,750	2,602	0,148	2,594	0,156	2,540	0,210
2,875	2,718	0,157	2,709	0,166	2,654	0,221
3,000	2,843	0,157	2,835	0,165	2,776	0,224
3,125	2,970	0,155	2,961	0,164	2,901	0,224
3,250	3,087	0,163	3,077	0,173	3,016	0,234
3,375	3,216	0,159	3,208	0,167	3,144	0,231
3,500	3,341	0,159	3,332	0,168	3,267	0,233
3,625	3,459	0,166	3,450	0,175	3,384	0,241
3,750	3,591	0,159	3,582	0,168	3,513	0,237
3,875	3,713	0,162	3,703	0,172	3,633	0,242
4,000	3,836	0,164	3,826	0,174	3,753	0,247

Napětí generátoru [V]	Frekvence=100 kHz		Frekvence = 300 kHz	
	Napětí na C [V]	Úbytek na D [V]	Napětí na C [V]	Úbytek na D [V]
0,250	0,172	0,078	0,095	0,155
0,375	0,260	0,115	0,150	0,225
0,500	0,590	-0,090	0,221	0,279
0,625	0,479	0,146	0,297	0,328
0,750	0,590	0,160	0,375	0,375
0,875	0,703	0,172	0,457	0,418
1,000	0,816	0,184	0,539	0,461
1,125	0,932	0,193	0,627	0,498
1,250	1,046	0,204	0,713	0,537
1,375	1,163	0,212	0,804	0,571
1,500	1,280	0,220	0,894	0,606
1,625	1,396	0,229	0,988	0,637
1,750	1,513	0,237	1,079	0,671
1,875	1,631	0,244	1,173	0,702
2,000	1,750	0,250	1,269	0,731
2,125	1,870	0,255	1,365	0,760
2,250	1,990	0,260	1,464	0,786
2,375	2,111	0,264	1,564	0,811
2,500	2,241	0,259	1,672	0,828
2,625	2,315	0,310	1,729	0,896
2,750	2,425	0,325	1,835	0,915
2,875	2,534	0,341	1,928	0,947
3,000	2,654	0,346	2,029	0,971
3,125	2,776	0,349	2,132	0,993
3,250	2,887	0,363	2,227	1,023
3,375	3,011	0,364	2,334	1,041
3,500	3,131	0,369	2,423	1,077
3,625	3,243	0,382	2,520	1,105
3,750	3,370	0,380	2,629	1,121
3,875	3,486	0,389	2,729	1,146
4,000	3,605	0,395	2,830	1,170

G. OBSAH PŘILOŽENÉHO MULTIMÉDIA

- Bakalářská práce v elektronické podobě
- Složka souborů „Pictures used in bachelor thesis“ obsahující obrázky užívané v práci
- Složka souborů „Eagle Projects“ obsahující projektové soubory RLC měřiče v programu EAGLE
- Složka souborů „Gerber Files“ obsahující gerber soubory pro výrobu desek plošných spojů jak zdroje, tak samotného měřiče
- Složka souborů „Schematic and board files“ obsahující soubory typu .sch a .brd, což jsou soubory návrhu schémat i desky v programu EAGLE
- Složka „Software“ obsahující projektový soubor prostředí Atmel Studio a obsahuje zdrojový kód RLC měřiče.